

**Beitrag zur Modellierung eines Doppelwalzenbrechers hinsichtlich
der Produktpartikelgrößenverteilung und des Massestromes**

Von der Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg
genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt

von Philipp Thiere, M.Sc.
geboren am 01. September 1988 in Pirna

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Holger Lieberwirth, Freiberg
Prof. Dr.-Ing. Jan Rosenkranz, Luleå (Schweden)

Tag der Verleihung: 20. November 2020

Danksagung

Zuallererst möchte ich meinem Sohn Friedrich danken, der mich zwar wieder und wieder daran hinderte, aber dennoch der Grund für die schlussendliche Fertigstellung dieser Arbeit ist. Meiner Frau Alexandra danke ich ganz besonders für ihre Geduld während der Anfertigung der Arbeit und für ihre ständige Aufforderung, ein paar Zeilen und Seiten dieser Dissertation zu schreiben.

Weiterhin bedanke ich mich bei Prof. Holger Lieberwirth, der mich neben der Betreuung dieser Doktorarbeit mit zahlreichen Anregungen und Hinweisen zu jeder Zeit unterstützte.

Darüber hinaus gilt mein Dank Prof. Jan Rosenkranz für die Übernahme des Zweitgutachtens und das damit verbundene Interesse an meiner Arbeit.

Bei meinem Industriepartner THYSSENKRUPP INDUSTRIAL SOLUTIONS AG bedanke ich mich für die Finanzierung und Bereitstellung des Forschungsthemas. Dr. Falk Silbermann danke ich für die vielen fachlichen Gespräche und Anregungen, den Kollegen der F&E-Abteilung sowie den Mitarbeitern des Technikums für die Unterstützung bei der Durchführung der Versuche und vor allem dem damaligen Studenten Zedong Xu für die tatkräftige Hilfe bei den experimentellen Untersuchungen im Rahmen seiner Bachelorarbeit.

Ein großer Dank gilt weiterhin Dr. Klaus Meltke für das entgegengebrachte Vertrauen zur Anfertigung dieser Dissertation und den Mitarbeitern des Institutes für Aufbereitungsmaschinen für die schöne Zeit.

Zu guter Letzt danke ich meiner Mutter Kathrin, die mir bedingungslos mit Rat und Tat in allen Lebenslagen zur Seite steht und immer an mich glaubt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Motivation	1
2	Wissenschaftlich-technischer Stand zur Zerkleinerung in Walzenbrechern	3
2.1	Einfluss- und Zielgrößen der Zerkleinerung in Walzenbrechern	3
2.2	Einordnung von Walzenbrechern	6
2.2.1	Einordnung nach konstruktiven Maschinenparametern	6
2.2.2	Einordnung nach der Belastungsart	9
2.3	Modellierung der Zerkleinerung in Walzenbrechern	10
2.3.1	Einzugsverhalten	10
2.3.2	Massedurchsatz	17
2.3.3	Produktpartikelgrößenverteilung	22
2.4	Abschlussbetrachtung und Ableitung der Aufgabenstellung	27
3	Experimentelle Untersuchungen	29
3.1	Versuchsstand Doppelwalzenbrecher	29
3.1.1	Grundlegender Aufbau des Versuchsstandes	29
3.1.2	Aufbau des Walzenbrechers und verwendete Messtechnik	30
3.1.3	Brechwalzen und Profilierung	32
3.1.4	Kalibrierung der Bandwaage	33
3.2	Versuchsprogramm	35
3.3	Charakterisierung der Aufgabematerialien	37
3.3.1	Druckfestigkeit	37
3.3.2	Partikelgrößenverteilung	39
3.3.3	Rohdichte und Schüttdichte	41
3.3.4	Quantitative Gefügeanalyse	42
3.4	Versuchsdurchführung	45
3.4.1	Versuche ohne Überpartikel	45
3.4.2	Versuche mit Überpartikeln	47
4	Ergebnisse und Auswertung	49
4.1	Einzugsverhalten übergroßer Partikel	49

4.2	Partikelgrößenverteilung der Zerkleinerungsprodukte.....	51
4.2.1	Einfluss der Walzenumfangsgeschwindigkeit	52
4.2.2	Einfluss der Spaltweite	56
4.2.3	Einfluss der Aufgabeverteilung.....	58
4.2.4	Einfluss des Aufgabematerials	60
4.2.5	Zusammenfassung	62
4.3	Massedurchsatz.....	63
4.3.1	Einfluss der Walzenumfangsgeschwindigkeit und der Festigkeit des Aufgabematerials.....	66
4.3.2	Einfluss der Spaltweite	67
4.3.3	Einfluss der Aufgabepartikelgröße	69
4.3.4	Zusammenfassung	71
5	Modellbildung	72
5.1	Partikelgrößenverteilung des Produktes.....	72
5.1.1	Prüfung der Eignung der Swebrec-Funktion	72
5.1.2	Aufstellen eines Modellansatzes und Erarbeitung der notwendigen Zusammenhänge.....	74
5.1.3	Prüfung des Modellansatzes	78
5.1.4	Ausblick für andere Gesteine	80
5.2	Massedurchsatz.....	81
5.2.1	Aufstellen eines Modellansatzes	82
5.2.2	Verallgemeinerung des Modells	85
6	Zusammenfassung.....	88
	Literaturverzeichnis	94
	Abbildungsverzeichnis	99
	Tabellenverzeichnis.....	104
	Symbolverzeichnis	106
	Abkürzungsverzeichnis	110
	Anhang.....	A-1

1 Einleitung und Motivation

Die Zerkleinerung mit Hilfe von Walzen ist ein altbewährtes Prinzip. In der Gesteinszerkleinerung werden dafür häufig Doppelwalzenbrecher eingesetzt, bei denen das Material zwischen zwei gegenläufig rotierenden Walzen gebrochen wird. Dabei sind heute in der Primärbrechstufe vor allem Brecher mit profilierten Walzen von Bedeutung. Diese bieten im Gegensatz zu glatten Walzen verbesserte Einzugsbedingungen, sodass größere Partikel eingezogen und zerkleinert werden können. Weiterhin erzeugen profilierte Walzen bzgl. der Partikelgrößenverteilung des Produktes weniger feines Material, dessen Masseanteil sich über die entsprechende Profilierung der Walzen beeinflussen lässt. Darüber hinaus besitzt der Profilwalzenbrecher eine einfache bzw. robuste Konstruktion und ist auch für klebriges Material, wie beispielsweise Ölsand, Ton bzw. tonverunreinigten Kalkstein und Gips, geeignet. Durch das kontinuierliche Brechprinzip infolge der rotierenden Walzen sind höchste Durchsätze, z. B. von über 14.000 t/h im Ölsandeinsatz, möglich [1]. Aufgrund der bei der Zerkleinerung auftretenden Keilwirkung infolge der Zähne wird das Material neben der Druck- auch durch Zugbeanspruchung zerkleinert. Da die Zugfestigkeit von sprödbrechendem Gestein um ein vielfaches kleiner als deren Druckfestigkeit ist, ist die Zerkleinerung in Profilwalzenbrechern energieeffizienter gegenüber anderen Brechern mit reiner Druckzerkleinerung [2].

Neben den Profilwalzenbrechern existieren noch bauartähnliche Maschinen, welche in dieser Arbeit jedoch nicht behandelt werden. Dazu zählt der sogenannte Sizer, der üblicherweise kleinere Walzendurchmesser in Kombination mit markanteren Profilierungen aufweist. Der bedeutendste Unterschied ist jedoch das Antriebskonzept, bei dem der Sizer nach dem „low speed – high torque“ Prinzip arbeitet. Aufgrund der geringeren Schwungmassen und damit einer kleineren zur Verfügung stehenden Rotationsenergie zur Überwindung von Lastspitzen arbeitet der Sizer mit hohen Antriebsdrehmomenten und infolgedessen mit kleinen Walzenumfangsgeschwindigkeiten. Weiterhin gibt es noch exzentrisch arbeitende Walzenbrecher, bei denen eine zylindrische Walze auf einer Exzenterwelle montiert angetrieben wird. Zerkleinert wird bei diesem Typ zwischen der Walze und einer feststehenden, gekrümmten Brechbacke. Dieser Brecher kann wahlweise mit einem integrierten Sieb vor der Brechkammer betrieben werden, um den Feinanteil am Brechraum vorbeizuführen [3]. Darüber hinaus gibt es auch noch andere, weniger bedeutende Bauarten von Walzenbrechern, beispielsweise mit konischen Walzen.

Obwohl der Walzenbrecher in den letzten Jahren wieder an Bedeutung gewonnen hat, basiert die verfahrenstechnische Auslegung der Zielgrößen, wie Durchsatzleistung und Partikelgrößenverteilung des Produktes, vor allem auf einfachen analytischen und empirischen Berechnungsmodellen bzw. auf Erfahrungswerten der Anlagenhersteller. Beispielsweise werden in den Modellen zur Prognose des Massedurchsatzes übergroße Partikel bisher ungenügend berücksichtigt (siehe Kapitel 2.3.2). Diese haben jedoch einen bedeutenden Einfluss auf den Durchsatz und bereiten folglich Schwierigkeiten in der Auslegung. Schon

wenige Masseprozent an Überpartikeln im Aufgabematerial können einen Einbruch in der Durchsatzleistung verursachen.

Da empirische Auslegungsmodelle meist auf umfangreichen und zeitaufwendigen experimentellen Zerkleinerungsversuchen basieren, wird zur Auslegung von Walzenbrechern auch die Diskrete Elemente Methode (DEM) verwendet. Die Diskrete Elemente Methode wird bereits erfolgreich in der Simulation von Partikel- bzw. Schüttgutbewegungen eingesetzt, beispielsweise für Gurtbandförderer. Bei der Simulation der Partikelzerkleinerung in einem Brecher besteht die Schwierigkeit in der Kalibrierung des Modells, da der Zerkleinerungsprozess neben dem Partikelfluss auch den Partikelbruch beinhaltet. Die Kalibrierung des Zerkleinerungsmodells in der DEM-Simulation wird deshalb gegenwärtig häufig wiederum mit experimentellen Versuchen unter bekannten Eingangs- und Ausgangsgrößen durchgeführt [4].

Aufgrund der Unsicherheiten der bestehenden Modelle besteht das Ziel dieser Arbeit darin, verbesserte Modelle zur Auslegung der wichtigsten Zielgrößen von profilierten Doppelwalzenbrechern zu entwickeln. Eines dieser Modelle soll neben beliebigen Aufgabepartikelgrößenverteilungen insbesondere den Einfluss von übergroßen, nicht sofort einziehbaren Partikeln auf den Massedurchsatz berücksichtigen. Weiterhin soll ein Modell zur Prognose der Produktpartikelgrößenverteilung erarbeitet werden, welches auf einer neuen Verteilungsfunktion (Swebrec-Funktion) basiert (siehe Kapitel 2.3.2). Die dazu benötigten Daten sollen aus experimentellen Untersuchungen gewonnen werden.

2 Wissenschaftlich-technischer Stand zur Zerkleinerung in Walzenbrechern

In diesem Kapitel werden die für diese Arbeit relevanten Grundlagen und der wissenschaftlich-technische Stand zur Zerkleinerung in Walzenbrechern behandelt. Walzenbrecher eignen sich vor allem zur Zerkleinerung von Stoffen mit geringer bis mittlerer Festigkeit. Mit zunehmender Festigkeit und höherem Quarzgehalt steigt der Verschleiß, hauptsächlich der Walzen, jedoch zunehmend, wodurch vor allem Profilwalzenbrecher weniger geeignet sind für die Zerkleinerung fester Materialien [5]. Weiterhin werden Walzenbrecher für klebriges, feuchtes und gefrorenes Material wie Kalkstein, Kohle, weniger festes Erz und Ölsand eingesetzt [5] [6, S. 132]. Glatwalzenbrecher erreichen üblicherweise nur geringe Zerkleinerungsverhältnisse ε von bis zu $\varepsilon = 4$ [7, S. 96]. Bei Profilwalzenbrechern werden höhere Werte bis $\varepsilon = 12$ erreicht [7, S. 103].

2.1 Einfluss- und Zielgrößen der Zerkleinerung in Walzenbrechern

Jede Zerkleinerungsmaschine, darunter auch der Walzenbrecher, stellt ein Stoffwandlungssystem dar. In diesem System bzw. dieser Maschine wird unter Zufuhr von Energie ein Eingangsstoffstrom (Aufgabematerial) in einen Ausgangsstoffstrom (Zerkleinerungsprodukt) gewandelt. Neben dem Vorgang des Brechens finden auch Transport- und Klassiervorgänge in der Maschine statt, welche jedoch dem Oberbegriff der Zerkleinerung in der Maschine zugeordnet werden [8, S. 146]. Dieser Vorgang ist abstrahiert als Black-Box-Modell in Abbildung 1 dargestellt.

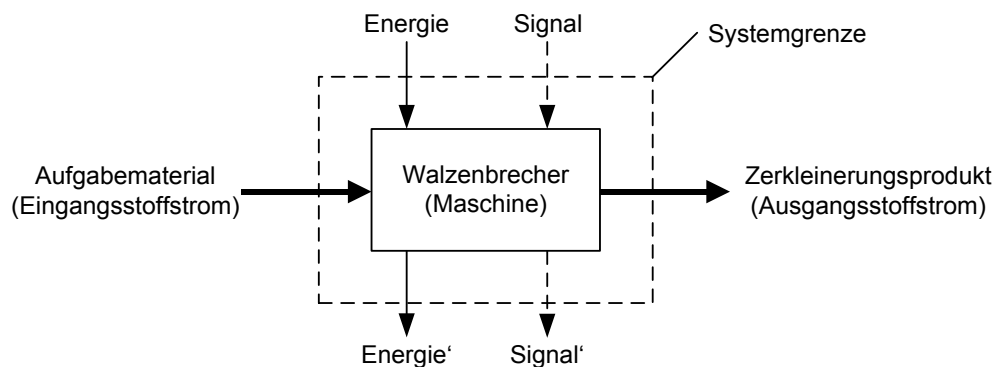


Abbildung 1: Black-Box-Modell eines Walzenbrechers

Die Maschine ist dabei von einer Systemgrenze vollständig umgeben, sodass genau definiert ist, was zum betrachteten System gehört. Die Systemgrenze umfasst hier nicht einzelne Teile des Walzenbrechers sondern den Brecher als Ganzes. Die Stoff-, Energie- und Signalströme wirken auf das System Walzenbrecher ein und überschreiten dabei die Systemgrenze.

Ziel der Zerkleinerung im Walzenbrecher ist es, ein Produkt mit definierten Eigenschaften bei bestimmten Eingangsparametern zu erzeugen. Dazu ist die Kenntnis der funktionellen Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Einflussgrößen x_i und Zielgrößen y_j nötig. Ist

der Zusammenhang bekannt, kann ein Auslegungsmodell der Form $y_j = f(x_i)$ aufgestellt werden. Zunächst müssen diese Parameter jedoch möglichst vollständig definiert werden.

Zum Aufstellen der Einfluss- und Zielgrößen werden zunächst mit Hilfe von Abbildung 2 der grundlegende Aufbau eines Profilwalzenbrechers erläutert und konstruktive Parameter definiert. Der Brecher besteht aus zwei gegenläufig rotierenden Walzengrundkörpern mit fluchtend aufgesetzten Brechwerkzeugen (Profilierung). Die Zerkleinerung erfolgt bei diesem Typ zwischen den beiden Walzen.

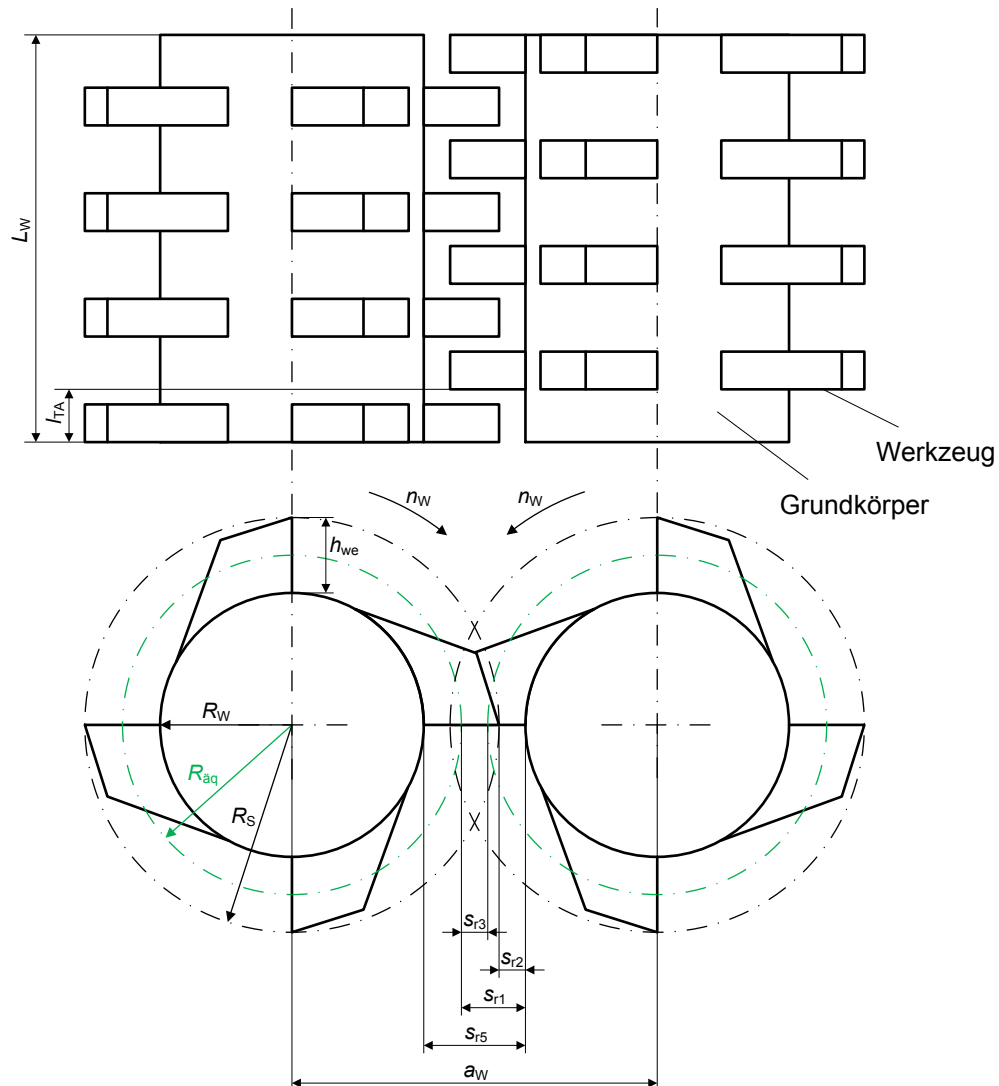


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Profilwalzenbrechers, ohne Gehäuse und Antrieb, bearbeitet nach SCHMIDT [9, S. 4]

Der Parameter Spaltweite s lässt bei Doppelwalzenbrechern Rückschlüsse auf die maximale Produktpartikelgröße zu. Zur Definition der Radialspaltweite s_r gibt es unterschiedliche Festlegungen. In dieser Arbeit werden die Spaltweiten in Anlehnung an SCHMIDT [9] bezeichnet. Im Falle von Glattwalzen (ohne aufgesetzte Brechwerkzeuge) ist die Spaltweite eindeutig als kleinster Abstand der Walzenoberflächen definiert, was s_{r5} entspricht [7, S. 97]. Bei gering profilierten Walzenbrechern kann entweder auch s_{r5} genutzt werden oder der Äquivalenzspalt s_{r3} einer querschnittsflächen- oder volumengleichen Glattwalze [10, S. 53]. Für stark profilierte

Walzenbrecher wird im Allgemeinen entweder der Abstand s_{r2} zwischen Zahnschnecke der einen und Grundkörper der anderen Walze [5] [11, S. 448] [12, S. 21] oder der Abstand s_{r1} zwischen Äquivalenzradius $R_{\text{äq}}$ und Grundkreisradius R_W genutzt. Teilweise wird jedoch auch s_{r5} benutzt [11, S. 446].

Eine umfassende Systemanalyse hinsichtlich der Einfluss- und Zielgrößen führte SCHMIDT [9] durch. Die Abbildung 3 fasst die wichtigsten Parameter zusammen. Die Einflussgrößen ergeben sich aus den Materialeigenschaften des Aufgabestoffes, den konstruktiven und betrieblichen Maschinenparametern sowie den interaktionsbezogenen Größen. Konstruktive Parameter resultieren u. a. aus Form, Abmessung und Anordnung der Grundkörper sowie ihren Profilierungen. Aber auch die Partikelgrößenverteilung und Feuchte des Aufgabematerials sowie die Walzendrehzahl spielen eine maßgebliche Rolle. Die Zielgrößen resultieren hauptsächlich aus den Anforderungen an das Produkt und an den Prozess (interaktionsbezogene Zielgrößen). Hier sind vor allem die Partikelgrößenverteilung bzw. der maximale Produktpartikeldurchmesser und der Massedurchsatz von Bedeutung.

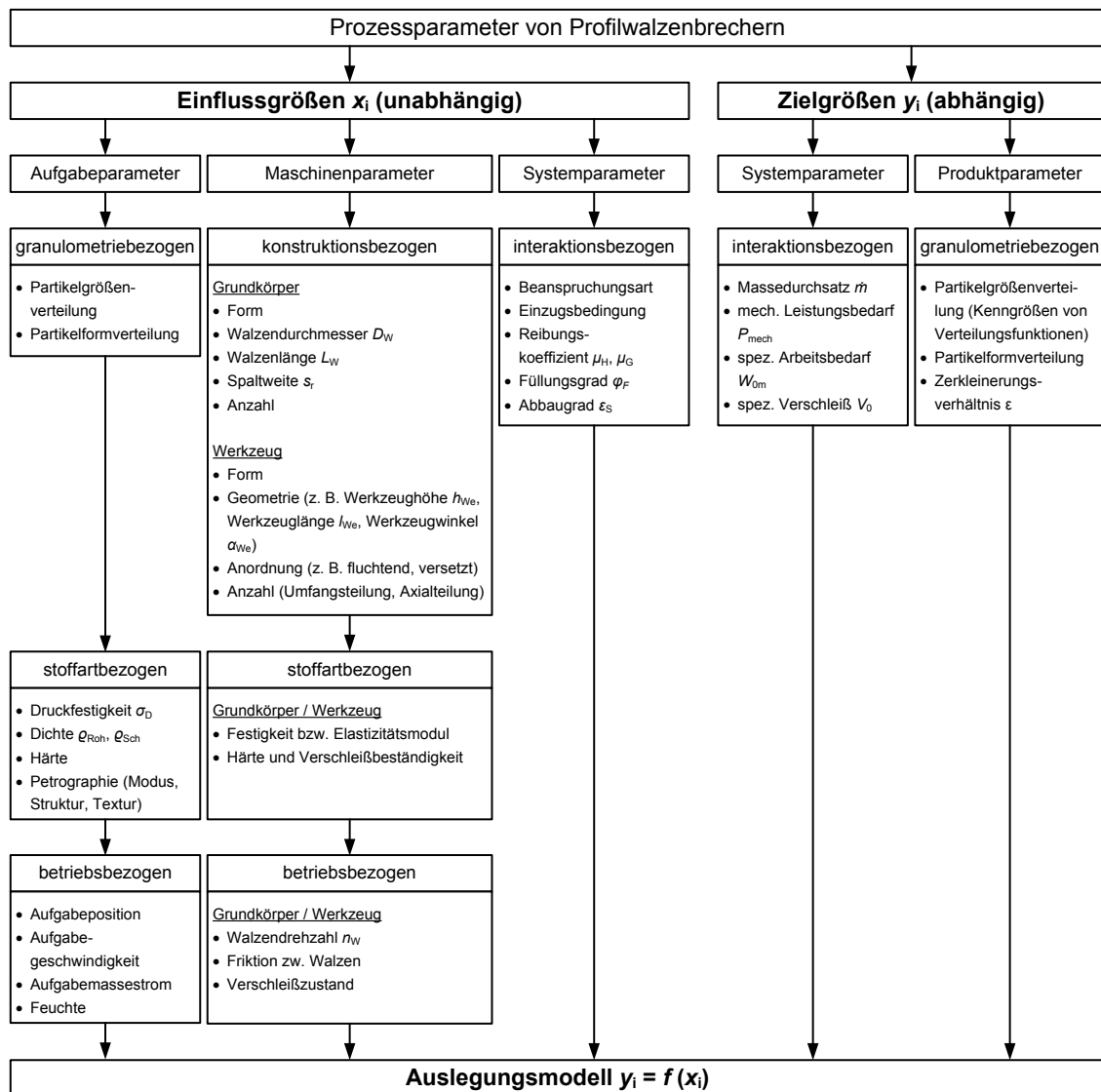


Abbildung 3: Einfluss- und Zielgrößen der Zerkleinerung in Profilwalzenbrechern, bearbeitet nach SCHMIDT [9, S. 6]

2.2 Einordnung von Walzenbrechern

Für Walzenbrecher, insbesondere für Profilwalzenbrecher, gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Typen hinsichtlich z. B. der Anordnung und Form der Werkzeuge, sodass eine Klassifizierung nach unterschiedlichen Merkmalen möglich ist. Bestehende Klassifizierungen unterscheiden Walzenbrecher z. B. nach der Walzenanzahl (Ein-, Zwei- oder Mehrwalzenbrecher mit vier- oder sechs Walzen [7, S. 95, 102]), der Walzenart (Glattwalzenbrecher oder Profilwalzenbrecher), der Werkzeugart (Nocken-, Zahn-, Stachel, Flügel-, Riffelwalzenbrecher etc. [13, S. 126-128]) oder auch der Materialzuführungsart und dem Zerkleinerungswirkprinzip. Da diese bestehenden Klassifizierungen gerade hinsichtlich der Profilierung häufig nur auf verbalen Beschreibungen basieren und wenig detailliert sind, entwickelte SCHMIDT [9] eine umfassendere Systematik zur Klassifizierung von Walzenbrechern unter Verwendung von ausgewählten Kennwerten. Er beschränkt sich dabei auf konstruktive Kriterien unter Berücksichtigung der Belastungsart, da diese am geeignetsten zur Klassifizierung sind. Im Folgenden werden die wichtigsten Punkte dieser neuen Systematik zusammengefasst.

2.2.1 Einordnung nach konstruktiven Maschinenparametern

Die Walzen eines Walzenbrechers bestehen üblicherweise aus einem Grundkörper und seiner Profilierung. Diese beiden Teile lassen sich jeweils nach ihrer Form, Abmessung, Anzahl und Anordnung einteilen. Der Grundkörper wird zusätzlich nach der Kinematik charakterisiert.

a) Grundkörper

Die Zerkleinerung in Walzenbrechern erfordert zwei Wirkflächen, die auf den Grundkörpern aufsitzen, über welche die Kräfte in die Partikel eingeleitet werden. SCHMIDT [9] unterscheidet dabei den Primär- und Sekundärgrundkörper. Unter dem Begriff Grundkörper ist hier die grundlegende Form der Walze zu verstehen. In der Praxis wird unter diesem Begriff häufig ein Körper mit fünf- oder sechseckigem Querschnitt verstanden, auf den austauschbare Brechplatten aufgeschraubt werden, welche mit Werkzeugen bestückt sind. Die Form und Kinematik der beiden Grundkörper bestimmt die Wirkungsweise der Wirkflächen (siehe Abbildung 4). Die Form des Primärgrundkörpers ist grundlegend eine Walze, im Allgemeinen mit zylindrischer oder selten auch kegelförmiger Form. Die Walzen werden meist rotierend und seltener oszillierend angetrieben. Zur Beschreibung der Größenverhältnisse einer Walze überträgt SCHMIDT [9] das von HÖFFL [7, S. 204] zur Beschreibung von Sturzmühlen verwendete Längendurchmesser-Verhältnis λ mit $\lambda = L_W/D_W$. Der Durchmesser D_W beschreibt dabei den Durchmesser des Walzengrundkörpers (Grundkreisdurchmesser) und L_W die Walzenlänge. Glattwalzen- und konventionelle Profilwalzenbrecher weisen meist gedrungene Walzen mit $\lambda \leq 1$ [14] auf. Für den Einsatz im Ölsand werden jedoch üblicherweise Brecher mit $\lambda > 1$ verwendet. Die sogenannten Sizer (langsam laufende, markant profilierte Walzenbrecher, üblicherweise mit Direktantrieb) besitzen in der Regel schlanke Walzen mit $\lambda \geq 2$ [14]. Die hier angegebenen Werte für λ stellen lediglich Richtwerte dar, da das Verhältnis in der Praxis abweichen kann.

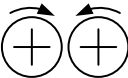

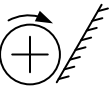

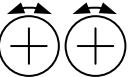
Elementtyp	sekundär						
	Form	Kinematik	Walze (Zylinder, Kegel)		Ebene		Leiste
			rotierend	oszillierend	bewegt	feststehend	feststehend
primär	Walze (Zylinder, Kegel)	rotierend					
		oszillierend					

Abbildung 4: Typ, Form und Kinematik der beiden Grundkörper eines Walzenbrechers, bearbeitet nach SCHMIDT [9, S. 10]

Der Sekundärgrundkörper (Gegengrundkörper) kann ebenfalls eine rotierende oder oszillierende Walze sein. Der zweite Grundkörper kann aber auch die Form einer bewegten Ebene (z. B. Durchlaufwalzenbrecher [15]), feststehenden Ebene (z. B. Walzenbackenbrecher [7, S. 91]) oder einer feststehenden Brechleiste (z. B. Side-Sizer) [16] annehmen. Die für die Praxis gebräuchlichsten Kombinationen sind der Doppelwalzenbrecher (zwei rotierende Walzen) und der Einwalzenbrecher in Form eines Durchlaufbrechers (eine rotierende Walze und eine bewegte Ebene). Die oszillierende Kinematik spielt eine eher untergeordnete Rolle.

Darüber hinaus wird die Anordnung der Grundkörper hinsichtlich verschiedener Kriterien, wie Höhenversatz oder Neigung der Walzen bzw. bei mehreren Grundkörperpaaren (Mehrwalzenbrecher mit z. B. vier oder sechs Walzen) die Serien- oder Parallelschaltung, unterschieden. Die Serienschaltung dient der Erhöhung des Zerkleinerungsgrades, während die Parallelschaltung eine Durchsatzsteigerung zum Ziel hat [7, S. 102]. Darüber hinaus gibt es auch freie Formationen, die keinem regelmäßigen Muster zugeordnet werden können.

b) Profilierung

Die Werkzeuge, die auf dem Walzengrundkörper aufsitzen, bilden die Profilierung der Walze. Sie können unterschiedliche Formationen und Formen aufweisen.

- **Werkzeugformation**

Die Werkzeugformation bestimmt die Anordnung der einzelnen Werkzeuge auf dem Walzengrundkörper. Damit lassen sich gezielt neben der Produktpartikelgrößenverteilung und der Verteilung des Massestromes im Brechraum auch die dynamischen Beanspruchungen der Maschine beeinflussen. Gemäß SCHMIDT [9] lassen sich die Werkzeugformationen nach Abbildung 5 einteilen. Die axial fluchtende Formation bietet den Vorteil einer größeren Eindringtiefe von Partikeln auf der ganzen Walzenlänge, was in kürzeren Verweilzeiten der Partikel oberhalb des Brechspaltes und geringerem Verschleiß der Walzen resultiert. Nachteilig bei dieser Formation sind jedoch der mögliche Durchgang von länglichen Partikeln und die stoßartige Belastung der Maschine. Die versetzten Formationen ermöglichen eine gleichmäßigere Zerkleinerung mit reduzierter Stoßbelastung. Darunter soll die spiralförmige Anordnung das Material, welches länger verweilt, in die weniger durchströmten Randbereiche

der Walze transportieren und somit „Materialblockaden“ entgegen wirken [9, S. 13]. Dabei kann der Winkelversatz zweier Werkzeuge mit α_v beschrieben werden (siehe Abbildung 6).

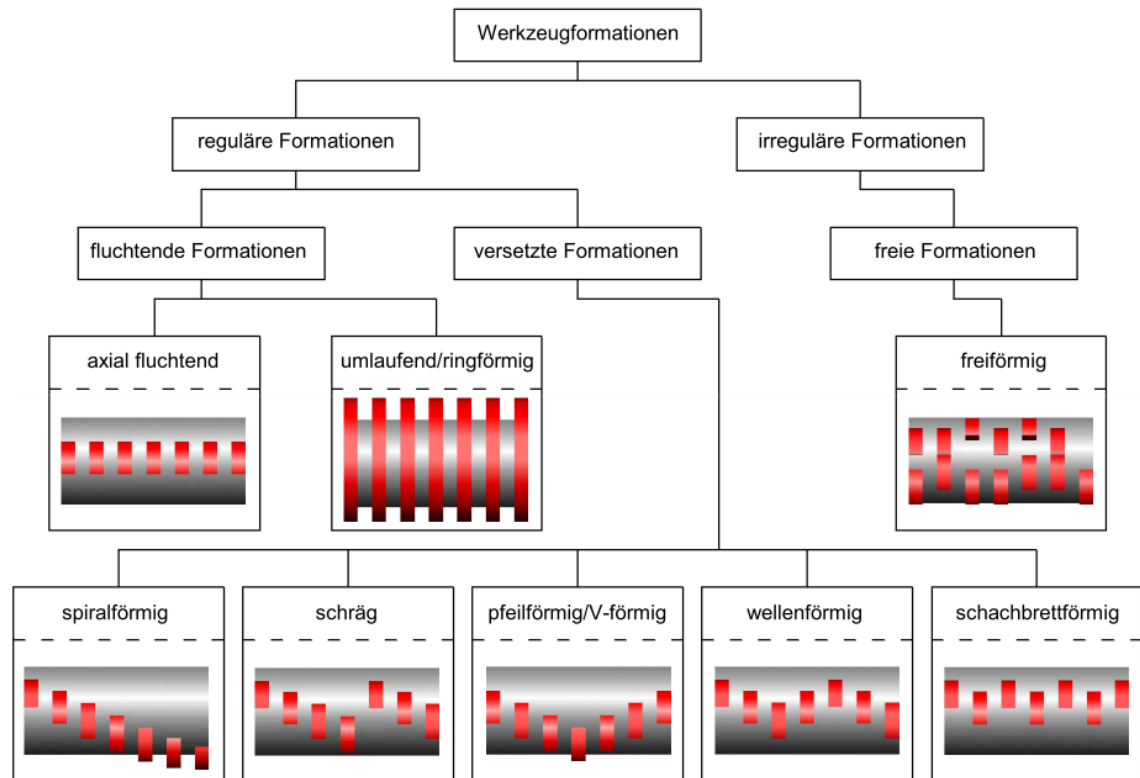


Abbildung 5: Schema zur Einteilung von Werkzeugformationen bei Profilwalzenbrechern, bearbeitet nach SCHMIDT [9, S. 13]

• Werkzeugform

Die Form der Werkzeuge bestimmt neben dem Einzugsverhalten vor allem die Geometrie im Walzenspalt. SCHMIDT [9] nutzt neben den üblichen qualitativen Beschreibungen für die allgemeine Gestalt (z. B. zylinder- oder kegelförmig, Nocken, Zahn oder Meißel) und deren Abmessungsverhältnisse (z. B. gedrunen oder schlank) auch Kennwerte zur Charakterisierung und Abgrenzung der Formen untereinander. Die Abbildung 6 zeigt die dazu nötigen Abmessungen von Walze und Profilierung.

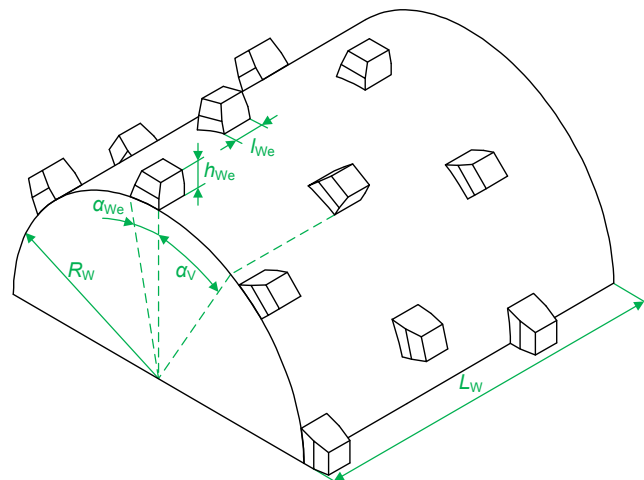


Abbildung 6: Abmessung von Grundkörper und Werkzeugen einer Walze zur Beschreibung der Werkzeugform

Abhängig vom Umlauf der Werkzeuge $\alpha_{We}/360^\circ$ (bezogen auf Umfangsrichtung der Walze), der Durchgängigkeit der Werkzeuge l_{We}/L_W in axialer Walzenrichtung und dem Profilierungsgrad h_{We}/R_W der Werkzeuge werden nach Abbildung 7 Leiste, Riffel, Ebene, Nocke, Zahn (einteilig) bzw. Meißel (mehrteilig, Werkzeughalterung und Spitze), Rille und Furche unterschieden. Im Weiteren spezifiziert SCHMIDT [9] die einzelnen Typen der Werkzeugformen noch näher anhand der äußeren Form, was in diesem Kapitel jedoch nicht weiter behandelt wird.

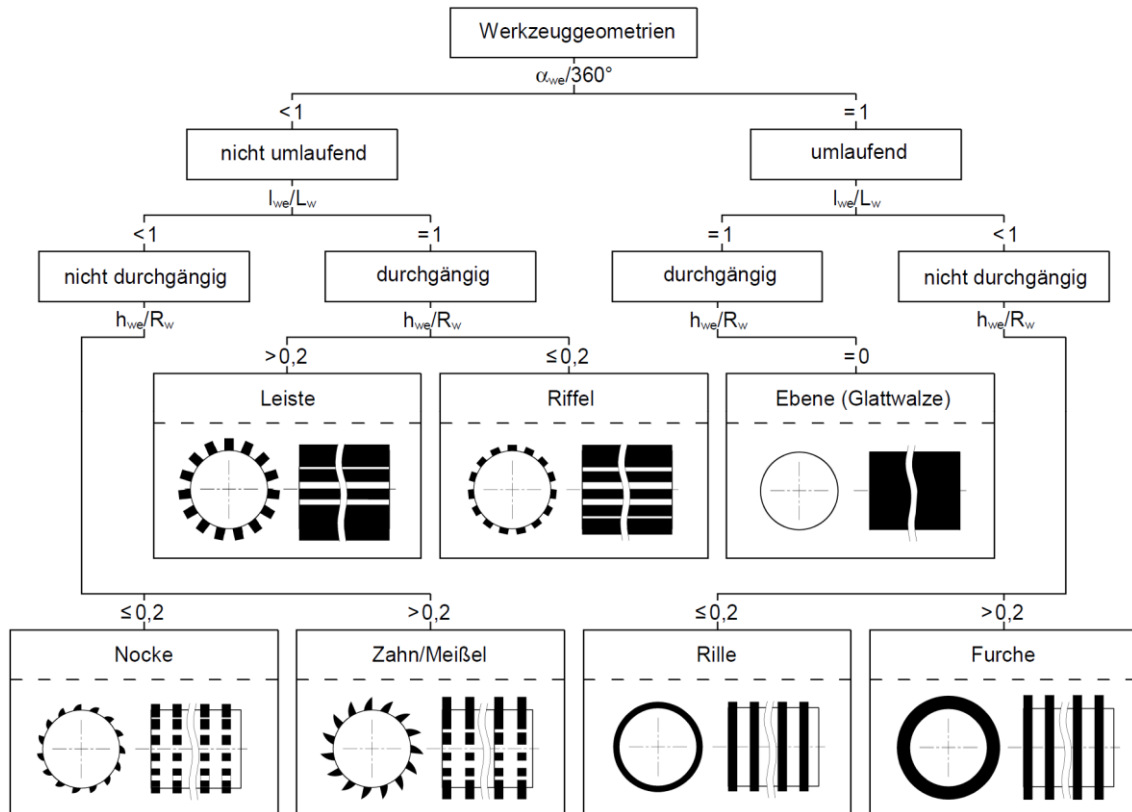


Abbildung 7: Klassifizierung der Werkzeugform von Profilwalzenbrechern nach SCHMIDT mit Hilfe der Abmessungsverhältnisse, bearbeitet nach SCHMIDT [9]

2.2.2 Einordnung nach der Belastungsart

Abhängig von der Größe des Aufgabematerials, der Walzenprofilierung, der Walzenumfangsgeschwindigkeit und damit der Beanspruchungsgeschwindigkeit ergeben sich durch die Wechselwirkung von Aufgabematerial und den Wirkflächen der Walze verschiedene Belastungsarten (Zerkleinerungswirkprinzipien), nach denen sich Walzenbrecher einteilen lassen. Abbildung 8 zeigt die Systematisierung nach der Belastungsart. Hierbei wird zunächst zwischen Überpartikel- und Unterpartikel Aufgabe unterschieden. Als Unterpartikel werden von den Walzen sofort einziehbare Partikel bezeichnet, während Überpartikel zunächst von den Walzen abgefräst, bevor sie komplett eingezogen werden.

In der Praxis werden bei Profilwalzenbrechern von den Betreibern auch Überpartikel aufgegeben, die nicht sofort eingezogen werden. In diesem Fall kommt es auch zur Fräszerkleinerung, welche jedoch nicht den Hauptanteil der Zerkleinerung ausmachen sollte.

Namensgebend ist diese Zerkleinerungsart für die Fräswalzenbrecher, welche meist mit weniger, dafür aber höheren und stabileren Werkzeugen ausgestattet sind und mit einem höheren Anteil an Überpartikeln beschickt werden.

Darüber hinaus wird bei der Unterpartikelauflage zwischen Einzelpartikel (EP) und Partikelkollektiv bzw. Gutbett (GB) sowie zwischen langsam- und schnelllaufenden Walzenbrechern unterschieden. SCHMIDT [9] setzt die Grenze zwischen langsam und schnelllaufend der Walzenumfangsgeschwindigkeit gleich und legt sie auf 10 m/s fest. Die Grenze ist in der Literatur nicht scharf definiert, da Walzenbrecher üblicherweise mit Walzenumfangsgeschwindigkeiten kleiner 5 m/s, manchmal auch bis 10 m/s betrieben werden. SCHMIDT ordnet Walzenbrecher mit Umfangsgeschwindigkeiten größer als 10 m/s den Prall- bzw. Schlagwalzenbrechern zu. Es ist jedoch anzumerken, dass die Beanspruchungsgeschwindigkeiten für typische Prallzerkleinerungsmaschinen mit 20...50 m/s laut HÖFFL [7] deutlich höher liegen.

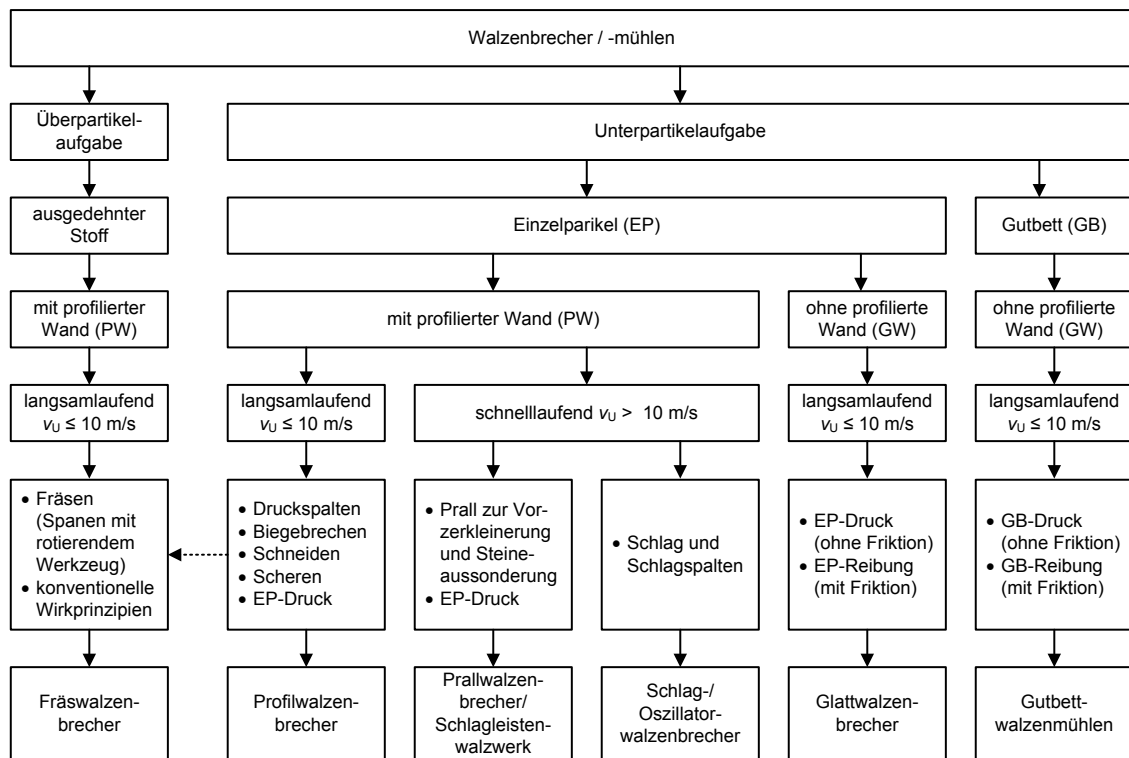


Abbildung 8: Einordnung von Walzenbrechern nach der Belastungsart, bearbeitet nach SCHMIDT [9]

2.3 Modellierung der Zerkleinerung in Walzenbrechern

2.3.1 Einzugsverhalten

Für eine effiziente Zerkleinerung ist ein rascher, möglichst gleitfreier Einzug der Partikel notwendig. Damit ein Partikel nicht aus dem Walzenspalt herausspringt, müssen die an ihm angreifenden Kräfte im Gleichgewicht sein. Die in der Literatur dargestellten Ansätze zur Berechnung der Einzugsbedingung beziehen sich auf Glattwalzen. Profilwalzen mit geringen Profilierungsgraden können jedoch durch Äquivalenzdurchmesser einer querschnittsflächen-

oder volumengleichen Glattwalze ersetzt werden [9, S. 32]. Darüber hinaus wird bei den Berechnungen meist von einem kugelförmigen Partikel ausgegangen, welches die ungünstigste Partikelform darstellt. Wenn ein Partikel in den Walzenspalt fällt, gibt es zwei mögliche Reibungsfälle, die eintreten können. Im Haftreibungsfall entsteht eine reibschlüssige Verbindung zwischen Partikel und den Walzenoberflächen. Im zweiten Fall tritt bei einer Relativgeschwindigkeit zwischen Partikel und Walzenoberfläche Gleitreibung auf. In der Literatur wird dieser Aspekt bisher kaum betrachtet. Daher wird er hier ausführlicher dargestellt.

- **Haftreibungsfall**

Für die Herleitung der Einzugsbedingung des Haftreibungsfalls (Index H) ist die Abbildung 9 zu betrachten.

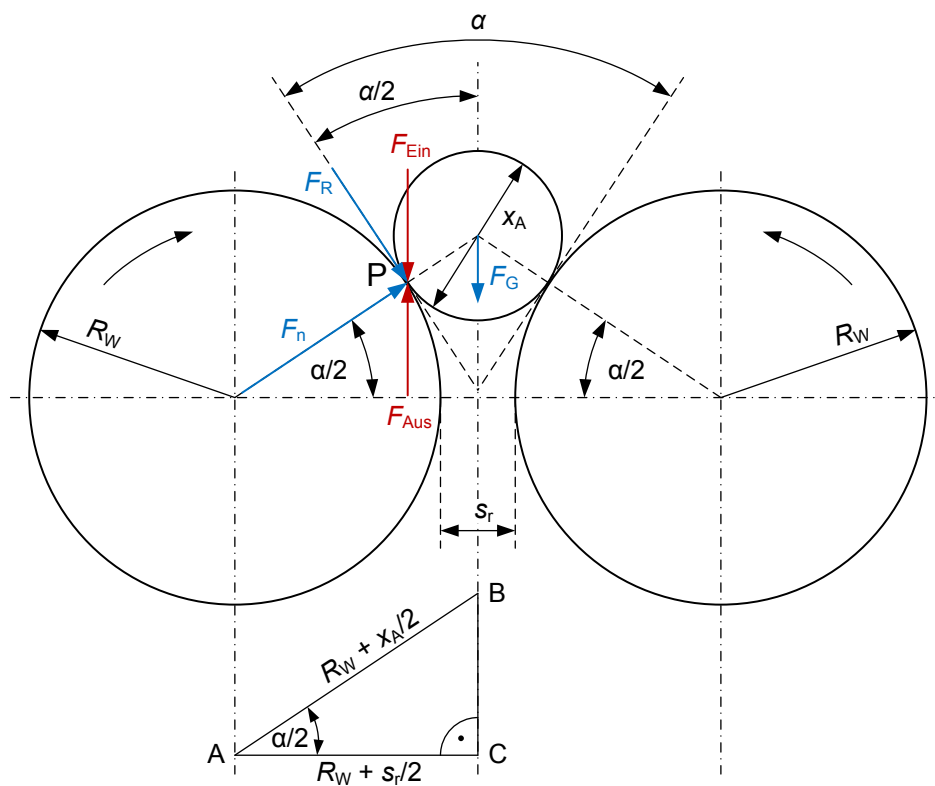


Abbildung 9: Skizze zur Herleitung der Einzugsbedingung sowie der Aufgabepartikelgröße für den Haftreibungsfall, bearbeitet nach STIEß [17]

Hier ergibt sich die einziehende Kraft $F_{Ein,H}$ nach Gleichung (2.1) aus der vertikalen Komponente der Haftreibungskraft F_{RH} . Die ausstoßende Kraft $F_{Aus,H}$ nach Gleichung (2.3) setzt sich nur aus dem vertikalen Anteil der Normalkraft F_{nH} zusammen. Für den Haftreibungsfall kann die Gewichtskraft bei Einzug eines Partikels vernachlässigt werden, da sie im Vergleich zur Normalkraft sehr klein ist. Die Normalkraft F_{nH} ist eine Reaktionskraft, die aufgrund des Drucks der Walzen gegen das Partikel im Kontaktpunkt P entsteht. Sie wird umso größer, je weiter das Partikel eingezogen wird, bis es schließlich bricht. Es kann folglich geschrieben werden:

$$F_{Ein,H} = F_{RH} \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2.1)$$

Mit $F_{RH} = \mu_H \cdot F_{nH}$ folgt:

$$\text{Einzugskraft} \quad F_{\text{Ein,H}} = \mu_H F_{nH} \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2.2)$$

$$\text{Ausstoßkraft} \quad F_{\text{Aus,H}} = F_{nH} \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2.3)$$

Soll ein Partikel nun eingezogen werden, muss die Einzugskraft $F_{\text{Ein,H}}$ mindestens so groß wie die Ausstoßkraft $F_{\text{Aus,H}}$ sein, damit die am Partikel angreifenden Kräfte im Gleichgewichtszustand sind. Es gilt:

$$F_{\text{Ein,H}} \geq F_{\text{Aus,H}} \quad (2.4)$$

$$\mu_H F_{nH} \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \geq F_{nH} \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2.5)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Einzugsbedingung} & \mu_H \geq \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \\ \text{bei Haftreibung} & \end{array} \quad (2.6)$$

Die Gleichung (2.6) stellt die Einzugsbedingung bei Haftreibung dar.

- **Gleitreibungsfall**

Im Falle von Gleitreibung ergibt sich im Gegensatz zum Haftreibungsfall keine kraftschlüssige Verbindung von Partikel und Walze. Die Walze rutscht unter dem Partikel durch, was insbesondere bei großen Partikeln im Grenzbereich der Einzugsfähigkeit relevant ist. Die bei Gleitreibung auftretenden Kräfte sind in Abbildung 10 dargestellt.

Die Gewichtskraft F_G verursacht bei symmetrischer Schwerpunktlage an einer Walze eine senkrecht nach oben gerichtete Gegenkraft $F_G/2$. Diese Gegenkraft wird in einen senkrecht auf die Walzenoberfläche gerichteten normalen Anteil, also die Normalkraft F_{nG} zerlegt. Durch Zerlegung von F_{nG} ergibt sich dann der vertikale Anteil der Normalkraft F_{nGv} , welcher die ausstoßende Kraft $F_{\text{Aus,G}}$ darstellt. Die Kräftezerlegung kann anhand der Formeln (2.7) bis (2.9) nachvollzogen werden.

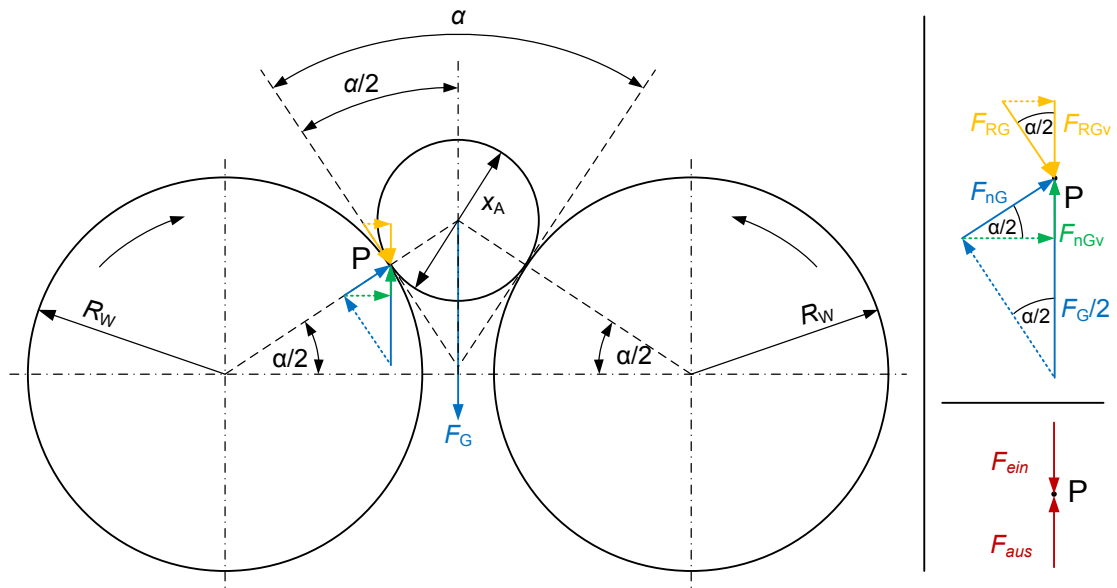


Abbildung 10: Skizze zur Herleitung der Einzugsbedingung für den Gleitreibungsfall
für Glattwalzenbrecher nach STIEß [17]; rechts: vergrößerte Darstellung der in Punkt P angreifenden Kräfte

Normalkraft
$$F_{nG} = \frac{F_G}{2} \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2.7)$$

Vertikalkomponente
der Normalkraft
$$F_{nGv} = F_{nG} \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2.8)$$

Durch Einsetzen von Gleichung (2.7) in (2.8) ergibt sich die ausstoßende Kraft:

Ausstoßkraft
$$F_{Aus,G} = F_{nGv} = \frac{F_G}{2} \cdot \left(\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)^2 \quad (2.9)$$

Die Einzugskraft berechnet sich aus der Vertikalkomponente F_{RGv} der Gleitreibungskraft F_{RG} nach Gleichung (2.10):

$$F_{Ein,G} = F_{RGv} = F_{RG} \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2.10)$$

Mit der Formel $F_{RG} = \mu_G \cdot F_{nG}$ folgt:

$$F_{Ein,G} = \mu_G \cdot F_{nG} \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2.11)$$

Durch Einsetzen von Gleichung (2.7) in (2.11) ergibt sich abschließend die Einzugskraft:

Einzugskraft
$$F_{Ein,G} = \mu_G \cdot \frac{F_G}{2} \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2.12)$$

Soll im Gleitreibungsfall ein Partikel eingezogen werden, so muss nachfolgende Bedingung erfüllt sein:

$$F_{\text{Ein,G}} \geq F_{\text{Aus,G}} \quad (2.13)$$

$$\mu_G \cdot \frac{F_G}{2} \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \geq \frac{F_G}{2} \cdot \left(\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)^2 \quad (2.14)$$

Einzugsbedingung
bei Gleitreibung

$$\mu_G \geq \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2.15)$$

Die Gleichung (2.15) stellt die Einzugsbedingung bei Gleitreibung dar.

Abschließend zeigt sich, dass sowohl der Haft- als auch der Gleitreibungsfall dem gleichen Grundgesetz hinsichtlich der Einzugsbedingung unterliegen, jedoch im Gleitreibungsfall aufgrund des geringeren Gleitreibungskoeffizienten mit kleineren Einzugswinkeln gerechnet werden muss.

Die in der Literatur angegebenen Haftreibungskoeffizienten μ_H für die Materialpaarung Partikel-Walze betragen für die Paarung trockener Stein-Stahl $\mu_H = 0,30 \dots 0,35$ [7]. Für Kalkstein-Stahl wird $\mu_H = 0,24$ angegeben und für Marmor-Stahl $\mu_H = 0,17$ [17]. Um den Haftreibungsfall bei der Zerkleinerung zu erreichen, müsste die vertikale Einfallgeschwindigkeit des Partikels gleich der Vertikalkomponente der Walzenumfangsgeschwindigkeit sein. Dies ist in der Praxis jedoch kaum umzusetzen, da sich z. B. über das Verhältnis von Partikelgröße zu Spaltweite die Geschwindigkeitsvektoren ändern. Daher sollte mit niedrigeren Reibungskoeffizienten beim Einzugswinkel des jeweiligen Partikels gerechnet werden [18].

Für den Gleitreibungskoeffizienten μ_G zwischen Partikel und Walzenoberfläche sind in der Literatur kaum Angaben zu finden. Für hartes, abrasives Material gibt MÖLLING [19] einen reduzierten Reibungskoeffizienten von $0,22 \dots 0,24$ und MOTEK [18] einen Wert von $0,22$ an. Der Gleitreibungskoeffizient μ_G kann bei bekannter Walzenumfangsgeschwindigkeit v_U auch aus dem Haftreibungskoeffizienten μ_H abgeschätzt werden. Dafür finden sich in der Literatur drei verschiedene Gleichungen:

Gleitreibungs-

koeffizient

nach [6, S. 134]

$$\mu_G = \frac{1 + 1,12 \cdot v_U \left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]}{1 + 6 \cdot v_U \left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]} \cdot \mu_H \quad (2.16)$$

Gleitreibungs-

koeffizient

nach [20]

$$\mu_G = \frac{1 + 0,0112 \cdot v_U}{1 + 0,006 \cdot v_U} \cdot \mu_H \quad (2.17)$$

Für die Formel (2.17) macht MUKHOPADHYA ET AL. [20] keine Angabe zur Einheit der Walzenumfangsgeschwindigkeit. SCHMIDT [9] gibt basierend auf diesen beiden Quellen [6] und [20] (welche selbst keine Originalquelle nennen) eine dritte Formel an.

Gleitreibungs-
koeffizient
nach [9]

$$\mu_G = \frac{1 + 0,0112 \cdot v_U \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]}{1 + 0,06 \cdot v_U \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]} \cdot \mu_H \quad (2.18)$$

Im Hinblick auf die Reibungskoeffizienten ist zu beachten, dass der Gleitreibungskoeffizient stets kleiner als der Haftreibungskoeffizient ist: $\mu_G < \mu_H$ [21, S. 91]. Daher gilt: $\mu_G/\mu_H < 1$. Zum Vergleich und zur Prüfung der Plausibilität der Gleichungen wird das Verhältnis aus Gleit- und Haftreibungskoeffizient μ_G/μ_H in Abhängigkeit der Walzenumfangsgeschwindigkeit dargestellt (siehe Abbildung 11). Dabei wird in Formel (2.17) die Walzenumfangsgeschwindigkeit in m/s eingesetzt.

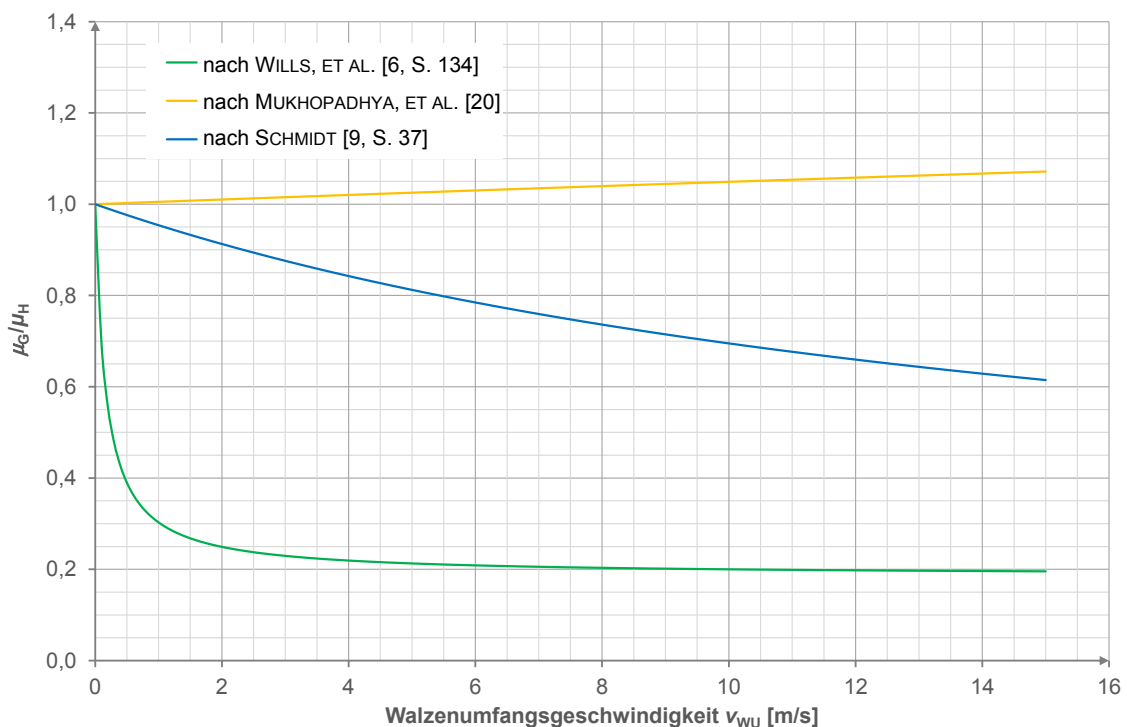


Abbildung 11: Abhängigkeit des Gleitreibungskoeffizienten μ_G von der Walzenumfangsgeschwindigkeit berechnet nach verschiedenen Literaturangaben

Die grüne Kurve nach WILLS ET AL. [6] zeigt bis zu einer Umfangsgeschwindigkeit von 2 m/s einen starken Abfall des Verhältnisses der Reibungskoeffizienten. Ab 6 m/s ändert sich der Wert kaum noch. Der Verlauf ähnelt dem einer Potenzfunktion mit negativem Exponenten. Der Wert des Gleitreibungskoeffizienten beträgt in weiten Teilen der Kurve nur ca. 20 – 30 % des Haftreibungskoeffizienten, was im Vergleich zu Literaturwerten [22, S. G176] niedrig ist. MUKHOPADHYA ET AL. [20] ändert die Faktoren aus Gleichung (2.16) um den Faktor 1/100 für 1,12 und um 1/1000 für 6 ab. Somit ergibt sich die gelbe Kurve, die jedoch für $v_U > 0$ stets Werte $\mu_G/\mu_H > 1$ zeigt. Das bedeutet, dass der Gleitreibungskoeffizient stets größer als der Haftreibungskoeffizient ist. Das entspricht jedoch nicht der Realität. SCHMIDT [9] mindert beide Faktoren um den gleichen Faktor von 1/100 ab, sodass der Reibwert fast linear über den Geschwindigkeitsbereich abfällt.

Laut Literatur [23, S. 133] ist der Gleitreibungskoeffizient nur sehr schwach von der Gleitgeschwindigkeit abhängig. Zudem geht die Haftreibung im Grenzbereich schnell in Gleitreibung über. Daher scheint qualitativ gesehen die grüne Kurve nach WILLS ET AL. [6] am plausibelsten.

Der für die Auslegung von Walzenbrechern benötigte Mindestwalzendurchmesser $D_{W,min}$ für eine gegebene Aufgabepartikelgröße x_A bzw. die maximale Aufgabepartikelgröße $x_{A,max}$ bei gegebenem Walzendurchmesser D_W (gleich große Walzen) berechnet sich aus folgender geometrischen Beziehung des Dreiecks ABC nach Abbildung 9.

$$\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{\left(R_W + \frac{s_r}{2}\right)}{\left(R_W + \frac{x_A}{2}\right)} \quad (2.19)$$

Durch Umformen der Gleichung (2.19) und Einsetzen von $R_W = D_W/2$ errechnet sich der Walzendurchmesser D_W aus:

Walzen-
durchmesser

$$D_W = \frac{\left(x_A \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) - s_r\right)}{\left(1 - \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)} \quad (2.20)$$

Wird $\cos(\alpha/2)$ durch

$$\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \tan^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)}} \quad (2.21)$$

ersetzt, ergibt sich Gleichung (2.22).

$$D_W = \frac{x_A - s_r \cdot \sqrt{\left(1 + \tan^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)}}{\sqrt{\left(1 + \tan^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)} - 1} \quad (2.22)$$

Durch Einsetzen von Gleichung (2.6) bzw. (2.15) in (2.22) errechnet sich der Mindestwalzendurchmesser $D_{W,min}$ bei gegebener Aufgabepartikelgröße x_A nach:

Mindestwalzen-
durchmesser

$$D_{W,min} > \frac{x_A - s_r \cdot \sqrt{(1 + \mu^2)}}{\sqrt{(1 + \mu^2)} - 1} \quad (2.23)$$

Für μ kann abhängig vom angenommenen Reibungsfall entweder der Haftreibungskoeffizient μ_H oder der Gleitreibungskoeffizient μ_G eingesetzt werden. Die maximale Aufgabepartikelgröße $x_{A,max}$ bei gegebenen Walzendurchmesser D_W ergibt sich zu:

max. Aufgabe-
partikelgröße

$$x_{A,max} < \left((D_W + s_r) \cdot \sqrt{(1 + \mu^2)}\right) - D_W \quad (2.24)$$

Die theoretisch berechneten Werte weichen häufig von denen der Praxis ab. Vor allem bei Profilwalzenbrechern verliert der Mechanismus des Reibeinzugs mit größer bzw. markanter

werdender Profilierung zunehmend an Bedeutung, da hier eher der formschlüssige Einzug von Partikeln eine Rolle spielt. In der Literatur werden daher Richtwerte für das Verhältnis von Walzendurchmesser zu Aufgabepartikelgröße angegeben. Je kleiner das Verhältnis ist, desto größer sind die Partikel, die eingezogen werden können. Die Tabelle 1 fasst die Literaturwerte zusammen.

Tabelle 1: Literaturwerte zum Verhältnis von Walzendurchmesser zu Aufgabepartikelgröße, Profilierungsgrad von oben nach unten zunehmend

Brechertyp	Verhältnis $\frac{D_W}{x_A}$	Quelle
glatte Walzen	20...25	[7, S. 98; 13, S. 126]
	15...25	[24, S. 311]
geriffelte Walzen genockte Walzen	10...12	[7, S. 98; 13, S. 126]
	5...12	[24, S. 311]
gezahnte Walzen	5...10	[7, S. 98]
	2...6	[25, S. 21]
markant profilierte Sizer (Fräswalzenbrecher)	0,75	[26]

Die in diesem Kapitel gezeigten Berechnungen und Modelle basieren auf dem sofortigen Einzug eines idealen Einzelpartikels. Die gegenseitige Beeinflussung der Partikel bei Aufgabe eines Partikelstroms wird dabei nicht betrachtet. Auch werden in der Praxis häufig Überpartikel in Walzenbrechern aufgegeben, deren Größe über der theoretisch sofort einziehbaren Partikelgröße liegt. Als Einzelpartikel sollten diese so lange auf den Walzen verweilen, bis sie soweit abgefräst sind, dass sie von den Walzen eingezogen werden. Das Einzugsverhalten von Überpartikeln ist in der Literatur bisher wenig behandelt worden, sodass dazu keine Verweilzeiten bekannt sind. Weiterhin ist denkbar, dass sich ein unregelmäßig geformtes Überpartikel „verkugelt“ und praktisch nicht mehr eingezogen wird. Werden Überpartikel mit dem Materialstrom aufgegeben, findet eine gegenseitige Beeinflussung statt, indem das Überpartikel vom nachströmenden Material stetig in den Walzenspalt gedrückt wird und damit fortlaufend Kontakt zu den Zerkleinerungswerkzeugen erfährt. Dadurch ist eine Verminderung der Verweilzeit zu erwarten. Die Problematik des Einzugsverhaltens von Überpartikeln ohne und mit Materialdruck soll in dieser Arbeit in Kapitel 4.1 behandelt werden.

2.3.2 Massedurchsatz

In der Literatur werden zur Berechnung des Grenzdurchsatzes von Walzenbrechern fast ausschließlich kontinuumsmechanische Modellansätze verwendet [9, S. 38]. Hierbei wird davon ausgegangen, dass das Material den Spaltbereich als Kontinuum durchfließt. Der Grenzdurchsatz bezeichnet jenen Durchsatz, den ein Walzenbrecher unter bestimmten Betriebsbedingungen (z. B. bestimmte Spaltweite und Drehzahl) ohne Anstauung von Material oberhalb der Walzen leisten kann. Zunächst wird der Volumendurchsatz \dot{V} aus Spaltfläche A_S und der Materialgeschwindigkeit v_G im engsten Spalt nach Gleichung (2.25) berechnet.

$$\text{Volumendurchsatz} \quad \dot{V} = A_S \cdot v_G \cdot \varphi_F \quad (2.25)$$

Da die engste Spaltfläche beim Zerkleinerungsvorgang nicht zu 100 % mit Material gefüllt ist, enthält Gleichung (2.25) den sogenannten Füllungsgrad $\varphi_F \leq 1$. Der Füllungsgrad gibt an, welcher Anteil der Spaltfläche im engsten Spalt tatsächlich mit Material gefüllt ist. Er wird in der Literatur u. A. auch als Auflockerungsfaktor [7, S. 100] und Feststoffzuführung [17, S. 270] bezeichnet. Unter Einbeziehung der Rohdichte ϱ_{Roh} des Materials in Gleichung (2.26) kann der Grenzmassedurchsatz \dot{m} wie folgt errechnet werden.

$$\text{Grenzmasse-} \quad \dot{m} = \dot{V} \cdot \varrho_{\text{Roh}} = A_S \cdot v_G \cdot \varphi_F \cdot \varrho_{\text{Roh}} \quad (2.26)$$

durchsatz

In der Formel (2.26) wird die Partikelgrößenverteilung des Aufgabegutes nicht direkt berücksichtigt. Sie hat jedoch einen großen Einfluss auf den Durchsatz bei Walzenbrechern. Bei einer feinen Verteilung des Aufgabegutes (bspw. Großteil des Materials kleiner der Spaltweite) ist er erheblich größer als bei grober Verteilung. Durch den Füllungsgrad φ_F findet jedoch eine indirekte Berücksichtigung der Partikelgrößenverteilung statt. Der Füllungsgrad φ_F ist neben einer Reihe von anderen Faktoren auch von der Aufgabepartikelgröße bzw. der Partikelgrößenverteilung des Aufgabegutes abhängig und wird im nachfolgenden Abschnitt näher betrachtet.

Ebenfalls wird die maximale Aufgabepartikelgröße nicht berücksichtigt, die in der Praxis teilweise (vor allem bei Primärwalzenbrechern) deutlich über der theoretisch berechneten maximal einziehbaren Partikelgröße liegen kann. Wie im vorigen Kapitel 2.3.1 beschrieben, werden diese sogenannten Überpartikel nicht sofort eingezogen. Sie verweilen oberhalb der Walzen und blockieren eine gewisse Spaltfläche für nachfolgendes Material. Dies kann den Durchsatz erheblich mindern. Aus der Literatur ist über den Einfluss von Überpartikeln auf den Massedurchsatz bei Walzenbrechern bisher wenig bekannt. Diese Thematik soll in dieser Arbeit in den Kapiteln 4.3.3 und 5.2 aufgegriffen und untersucht werden.

a) Füllungsgrad

Die Angaben für den Füllungsgrad beziehen sich in der Literatur meist auf die Schüttdichte ϱ_{Sch} des Materials und nicht auf die Rohdichte ϱ_{Roh} , wie in Gleichung (2.26) angenommen. Da die Schüttdichte ϱ_{Sch} je nach Partikelgrößenverteilung und Partikelform einer Gesteinsschüttung nur etwa 50...60 % der Rohdichte ϱ_{Roh} entspricht [9, S. 42], muss in diesem Fall der Füllungsgrad φ_{F1} noch mit $\varphi_{F0} = 0,5 \dots 0,6$ (gilt für nicht zu feine Gesteinskörnungen) multipliziert werden um den Füllungsgrad $\varphi_F = \varphi_{F0} \cdot \varphi_{F1}$ zu erhalten. Ein Faktor von $\varphi_{F1} = 1$ bedeutet, dass die Dichte der Materialschüttung im engsten Walzenspalt den Wert der Schüttdichte erreicht.

Die Schüttdichte ϱ_{Sch} bezieht sich in der Literatur in einigen Quellen auf das Aufgabegut [27] [28, S. 148], teilweise aber auch auf das Zerkleinerungsprodukt [7, S. 100]. Manchmal fehlt aber auch die Abgabe, auf welches Material sich die Dichte bezieht [5] [13, S. 129].

Der Füllungsgrad hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab, wie z. B. den Betriebsbedingungen (Drehzahl, Beschickungsart), den Stoffeigenschaften (u. a. Festigkeit und Zähigkeit), der Partikelgrößenverteilung des Aufgabegutes und dem Zerkleinerungsgrad sowie von Walzenprofilierung und -durchmesser. SCHMIDT [9] gibt eine umfassende Auflistung des Füllungsgrades in Walzenbrechern in Abhängigkeit der unterschiedlichen Einflussfaktoren an. Der Füllungsgrad kann einen großen Wertebereich zwischen 0,1...0,75 für Walzenbrecher (bezogen auf die Schüttdichte) annehmen [9, S. 43]. Die Tabelle 2 zeigt die Abhängigkeit des Füllungsgrades von ausgewählten Einflussgrößen. Aufgrund der komplexen Abhängigkeiten des Füllungsgrades wird er teilweise auch in weitere Teilfaktoren zerlegt ($\varphi_{F1} = \varphi_{F11} \cdot \varphi_{F12}$). MÖLLING [29] bezeichnet φ_{F11} als Durchsatzkoeffizienten, welcher linear vom Zerkleinerungsverhältnis abhängig ist. Der Faktor φ_{F12} ist materialabhängig und beschreibt das Einzugsverhalten eines Materials, wobei höhere Werte ein besseres Einzugsverhalten bedeuten. Er wurde aus Durchsatzversuchen eines Backenbrechers ermittelt und reicht von 0,6 (Sillimanit) bis 1,0 (Dolomit).

Tabelle 2: Füllungsgrad φ_{F1} (bezogen auf die Schüttdichte) in Walzenbrechern in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussgrößen (GW = Glattwalze, PW = Profilwalze)

Einflussgröße	Abhängigkeit des Füllungsgrades φ_{F1}	Walze	Quelle
Abbaugrad	$\varphi_{F1} = 0,6 \cdot \frac{s_r}{x_{A,max}} + 0,15$	GW	[11, S. 431]
Zerkleinerungsgrad, Stoffart	$\varphi_{F1} = \varphi_{F11} \cdot \varphi_{F12}$; Durchsatzkoeffizient $\varphi_{F11} = -0,092 \cdot \varepsilon + 1,467$ Durchsatzverhalten φ_{F12} (stoffartabhängig)	GW	[29]
Aufgabeart	$\varphi_{F1} = 0,1 \dots 0,3$ (freie Aufgabe) $\varphi_{F1} = 0,4 \dots 0,6$ (überschüttete Aufgabe)	GW	[11, S. 431] [30, S. 316]
Aufgabepartikelgröße	$\varphi_{F1} = 0,2 \dots 0,3$; Grobzerkleinerung ($x_A > 100 \text{ mm}$) $\varphi_{F1} = 0,4 \dots 0,6$; Feinzerkleinerung ($0,1 \text{ mm} < x_A < 5 \text{ mm}$)	GW+PW	[7, S. 39, 100]
Einzugsverhältnisse	$\varphi_{F1} = 0,3$; $x_A \leq 0,8 \cdot x_{A,max}$ $\varphi_{F1} = 0,25$; $x_A > 0,8 \cdot x_{A,max}$	PW	[18]
Spaltweite	$\varphi_{F1} = 0,1$ für $s_r > 25 \text{ mm}$ $\varphi_{F1} = 0,15 \dots 0,2$ für $6,5 \text{ mm} \leq s_r \leq 25 \text{ mm}$ $\varphi_{F1} = 0,02 \dots 0,3$ für $s_r < 6,5 \text{ mm}$	GW	[11, S. 431]

Die Abbildung 12 zeigt aus der Literatur bekannte Zusammenhänge zwischen Füllungsgrad φ_{F1} (bzgl. Schüttdichte) und dem Zerkleinerungsverhältnis ε .

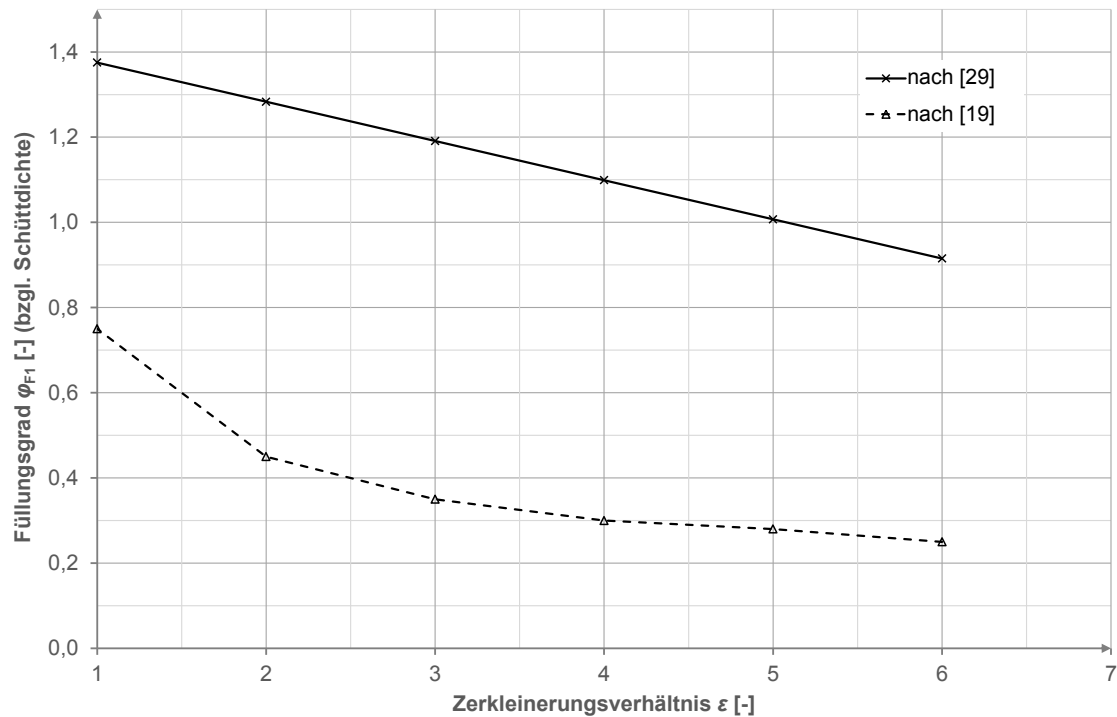


Abbildung 12: Füllungsgrad φ_{F1} in Abhängigkeit des Zerkleinerungsverhältnisses ε für Glattwalzenbrecher, nach [19], Kurve nach [29] für Dolomit mit $\varphi_{F12} = 1,0$

MÖLLING [19] zeigt einen mit abnehmendem Zerkleinerungsverhältnis progressiv steigenden Füllungsgrad. Auch HÖFFL [11, S. 431] gibt einen solchen Verlauf an (siehe Formel in Tabelle 2). Im Gegensatz dazu gibt MÖLLING [29] einen linear fallenden Zusammenhang zwischen Füllungsgrad und steigendem Zerkleinerungsverhältnis mit deutlich höheren Werten an. Die Kurve nach MÖLLING [29] in Abbildung 12 zeigt ein Beispiel für Dolomit mit einem Faktor für das Einzugsverhalten von $\varphi_{F12} = 1,0$. Die sich ergebenden Werte für den Füllungsgrad sind teilweise größer eins, was einer Dichte größer der Schüttdichte entsprechen würde und damit einer Materialverdichtung gleichkommt.

Weiterhin ist in der Literatur auch die Abhängigkeit des Füllungsgrades von der Radialspaltweite s_r für Glattwalzenbrecher erforscht worden, siehe Abbildung 13. Hier ergibt sich ebenfalls ein mit Verringerung der Spaltweite progressiv steigender Füllungsgrad bis $\varphi_{F1} = 0,6$ bei 2 mm Spaltweite.

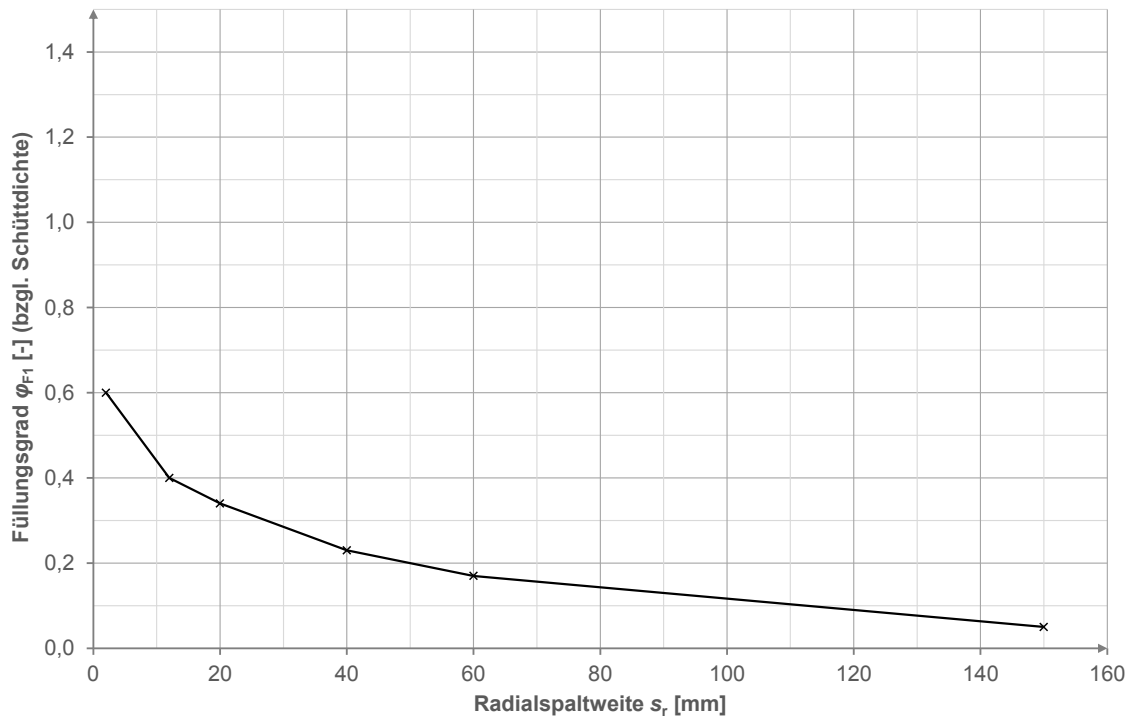


Abbildung 13: Füllungsgrad φ_{F1} in Abhängigkeit der Radialsplattweite s_r für Glattwalzenbrecher [31]

OTTE [32] definiert das Produkt von $(\varphi_{F1} \cdot \varrho_{Sch})$ als Betriebsdichte des Materials im Walzenspalt bei der Zerkleinerung. Für Glattwalzenbrecher ergeben sich geringe Werte von 0,25...0,6 t/m³ für $\varphi_{F1} = 0,15...0,30$ (abhängig von Spaltweite bzw. Produktpartikelgröße).

b) Materialgeschwindigkeit

Die Materialgeschwindigkeit v_G im engsten Spalt kann für Glatt- und gering profilierte Walzenbrecher bei identischen Drehzahlen gleich der Umfangsgeschwindigkeit v_U der Walzen am Grundkreis gesetzt werden [7, S. 100]. Für stark profilierte Walzenbrecher wird für v_G die Umfangsgeschwindigkeit der Zähne bei $R_m = 0,5 \cdot (R_S + R_W)$ angenommen [27].

c) Spaltfläche

Für Glattwalzenbrecher und gering profilierte Walzenbrecher (Profilierung vernachlässigbar) kann die Spaltfläche A_S mit dem Abstand zwischen den Grundkreisen der Walzen s_{r5} und der Walzenlänge L_W nach Gleichung (2.27) berechnet werden [13, S. 270].

$$\text{Spaltfläche (GW)} \quad A_S = s_{r5} \cdot L_W \quad (2.27)$$

Bei stärker profilierten Walzenbrechern kann der Werkzeugeinfluss nicht mehr vernachlässigt werden. Einfache Berechnungsformeln (Formel (2.28) und (2.29)) verwenden daher eine reduzierte Walzenlänge $L_W^* = 0,5...0,6 \cdot L_W$, um die Verkleinerung der Spaltfläche durch die Werkzeuge zu berücksichtigen [7, S. 104] oder die Spaltweite s_{r2} zwischen Zahnspitze der einen und Walzenrund der anderen Walze. [5]

$$\text{Spaltfläche (PW)} \quad A_S = s_{r5} \cdot L_W^* = s_{r5} \cdot (0,5...0,6) \cdot L_W \quad (2.28)$$

$$A_S = s_{r2} \cdot L_W \quad (2.29)$$

Da diese einfachen Ansätze jedoch die jeweilige Profilierungsgeometrie nicht mit betrachten, stellt SCHMIDT [9, S. 45-47] einen detaillierteren Ansatz vor. Aufgrund der Verringerung der Spaltfläche nach Gleichung (2.27) durch die Werkzeuge, ermittelt SCHMIDT [9] zunächst die mittlere Werkzeughöhe \bar{h}_{We} für eine Umdrehung der Walze. Mit konstanter Werkzeuglänge l_{We} und der Axialteilung $T_a = L_W/l_{Ta}$ berechnet sich die Spaltfläche dann wie folgt:

Spaltfläche (PW)
nach [9]

$$A_S = s_{r5} \cdot L_W - T_a \cdot l_{We} \cdot \bar{h}_{We} \quad (2.30)$$

Neben dem kontinuumsmechanischem Ansatz zur Bestimmung des Grenzdurchsatzes sind aus der Literatur auch empirische Modelle bekannt. Da die empirischen Modelle auf experimentellen Versuchen an bestimmten Maschinen mit unterschiedlichen Aufgabematerialien basieren, wird an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen.

2.3.3 Produktpartikelgrößenverteilung

Zur Prognose der Partikelgrößenverteilung des Produktes gibt es in der Literatur Ansätze, die auf bestimmten Verteilungsfunktionen und Regressionsmodellen aus experimentellen Untersuchungen basieren. Daneben existieren auch Bilanzmodelle, welche die fraktionellen Masseanteile bilanzieren.

a) Verteilungsfunktionen

Zur Beschreibung der Produktpartikelgrößenverteilung werden in der Literatur verschiedene Verteilungsfunktionen genutzt. SCHMIDT [9] fasst in seiner Arbeit bereits die experimentellen Untersuchungen von NAUNDORF [33] ausführlich zusammen, sodass hier nur die wichtigsten Erkenntnisse aufgeführt werden. NAUNDORF [33] führt umfassende Versuche zur Produktpartikelgrößenverteilung von Weichbraunkohle mit einem halbindustriellen Stachelwalzen- und Flügelbrecher durch. Er setzt fraktioniertes Aufgabegut ein und veränderte u. a. die Spaltweite, die Walzenumfangsgeschwindigkeit, die Geschwindigkeitsdifferenz der Walzen sowie den Aufgabemassestrom. Im Ergebnis schreibt NAUNDORF [33], dass die Produkte meist mischverteilt sind. Bei Stachelwalzenbrechern setzt sich die Verteilung aus drei (Fein-, Mittel- und Grobgut) und bei Flügelbrechern aus zwei Teilkollektiven (Fein- und Grobgut) zusammen. Die Produkte des Stachelwalzenbrechers folgen im Falle von Fein- und Grobgut einer zweiparametrischen RRSB-Verteilung und das Mittelgut einer zweiparametrischen Normalverteilung. Für Flügelbrecher folgt das Feingut ebenfalls einer zweiparametrischen RRSB-Verteilung und das Grobgut einer GGS-Verteilung. Die Haupteinflussgröße der Produktpartikelgrößenverteilung ist laut NAUNDORF [33] der Abbaugrad $\varepsilon_s = x_{A,max}/s_r$, welcher selbst von der maximalen Aufgabepartikelgröße und der Radialspaltweite abhängt. Aus den Ergebnissen entwickelt NAUNDORF [33] ein Regressionsmodell für die Produktpartikelverteilung in Abhängigkeit der genannten Größen. Es kann zusammengefasst werden, dass durch kleinere Spaltweiten bei

gleicher Aufgabepartikelgröße die Breite der Produktpartikelgrößenverteilung verkürzt, der Feingutanteil erhöht sowie der Grobgutanteil verringert wird. Durch die Vergrößerung des Spaltes bzw. die Verringerung der Aufgabepartikelgröße wird das Produkt zunehmend von der Aufgabepartikelgrößenverteilung bestimmt, da ein geringerer Materialanteil zerkleinert wird. Generell hängt mit steigendem Zerkleinerungsverhältnis die Partikelgrößenverteilung des Produkts immer weniger von der Aufgabepartikelgrößenverteilung ab. Auch die Walzenumfangsgeschwindigkeit soll laut NAUNDORF [33] Einfluss auf die Produktfeinheit haben. Er vermutet, dass mit steigender Umfangsgeschwindigkeit die Zerkleinerungswirkung aufgrund der höheren Beanspruchungsgeschwindigkeit zunimmt und das Produkt feiner wird. Die Versuche mit fraktioniertem Aufgabematerial zeigen, dass der Anteil an Feingut mit steigender Umfangsgeschwindigkeit des Stachelwalzenbrechers von ca. 2 m/s bis 7 m/s zunimmt. Eine Verstärkung des Einflusses mit zunehmender Aufgabepartikelgröße konnte jedoch nicht nachgewiesen werden [33].

Nach LOWRISON [34] entspricht die Produktpartikelgrößenverteilung für Glattwalzenbrecher einer GGS-Verteilung mit einem Exponenten von $k = 0,86 \dots 2,9$. Bei überschütteter Materialaufgabe ist das Produkt zudem feiner als bei Durchlaufbetrieb des Brechers.

Neben der GGS-, der Normal- und der RRSB-Verteilung kann das Produkt von Brechern auch mit der sogenannten Swebrec-Funktion beschrieben werden. Diese Verteilungsfunktion wurde im Rahmen des „Less Fines“-Projektes in den Jahren 2001 bis 2004 hauptsächlich zur Beschreibung der Verteilung von Sprenghaufwerken entwickelt [35]. Die Swebrec-Funktion wurde mit zahlreichen Partikelgrößenverteilungen unterschiedlicher Gesteine von Sprenghaufwerken aber auch Brechprodukten abgeglichen. Bis zum Jahr 2006 wurden laut OUCHTERLONY [35] [36] mehr als 400 Siebdatensätze aus Groß- und Modellsprengungen ausgewertet. Für verschiedene Zerkleinerungsmaschinen, u. a. für Steil- und Flachkegel-, Walzen- sowie Prallbrecher, wurden mehr als 250 Datensätze ausgewertet. Es wurde ebenfalls eine große Bandbreite an verschiedenen Materialien untersucht: Amphibolit, Andesit, Dolerit, Dolomit, Gabbro, Gneis, Grauwacke, Hornfels, Hyperit, Leptit, Kalkstein, Magnesit, Magnetit, Basalt, Quarzit, Sandstein, Tonstein, Syenit und Tonalit sowie Beton. Dabei werden in 95 % der Fälle Bestimmtheitsmaße von $R^2 > 0,995$ erreicht. Die Swebrec-Funktion basiert auf drei Parametern, x_{\max} , x_{50} und dem Kurvencharakteristikfaktor b . In der Basisform deckt die Funktion 2 bis 3 Partikelgrößenordnungen ab. Einen noch größeren Bereich deckt die erweiterte Swebrec-Funktion ab, auf die hier jedoch nicht näher eingegangen wird.

Die Basisversion der Swebrec-Funktion hat folgende Form [35]:

$$\begin{array}{ll} \text{Swebrec-Funktion} & Q_3(x) = \frac{1}{1 + \left[\frac{\ln\left(\frac{x_{\max}}{x}\right)}{\ln\left(\frac{x_{\max}}{x_{50}}\right)} \right]^b} \quad \text{für } 0 < x \leq x_{\max} \\ \text{(Basisversion)} & \end{array} \quad (2.31)$$

Die Verteilungssummenfunktion $Q_3(x)$ kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Der logarithmische Teil der Funktion nimmt den Wert 0 an, wenn $x = x_{\max}$ ist und den Wert 1 bei

$x = x_{50}$. Damit ist die Bedingung $Q_3(x_{\max}) = 1$ und $Q_3(x_{50}) = 0,5$ erfüllt. Die Größe x_{\max} stellt hier die obere Partikelgröße dar, x_{50} die mittlere Partikelgröße und der Exponent b den Kurvencharakteristikkfaktor. Der Exponent b beschreibt, wie steil die Verteilungsfunktion verläuft. Zur Veranschaulichung sind verschiedene b -Werte von 0,5 bis 6 bei sonst konstanten Parametern in Abbildung 14 dargestellt. Die b -Werte von 0,5 und 1 sind unüblich, zur besseren Verdeutlichung des Einflusses des b -Wertes jedoch in dieser Abbildung mit dargestellt.

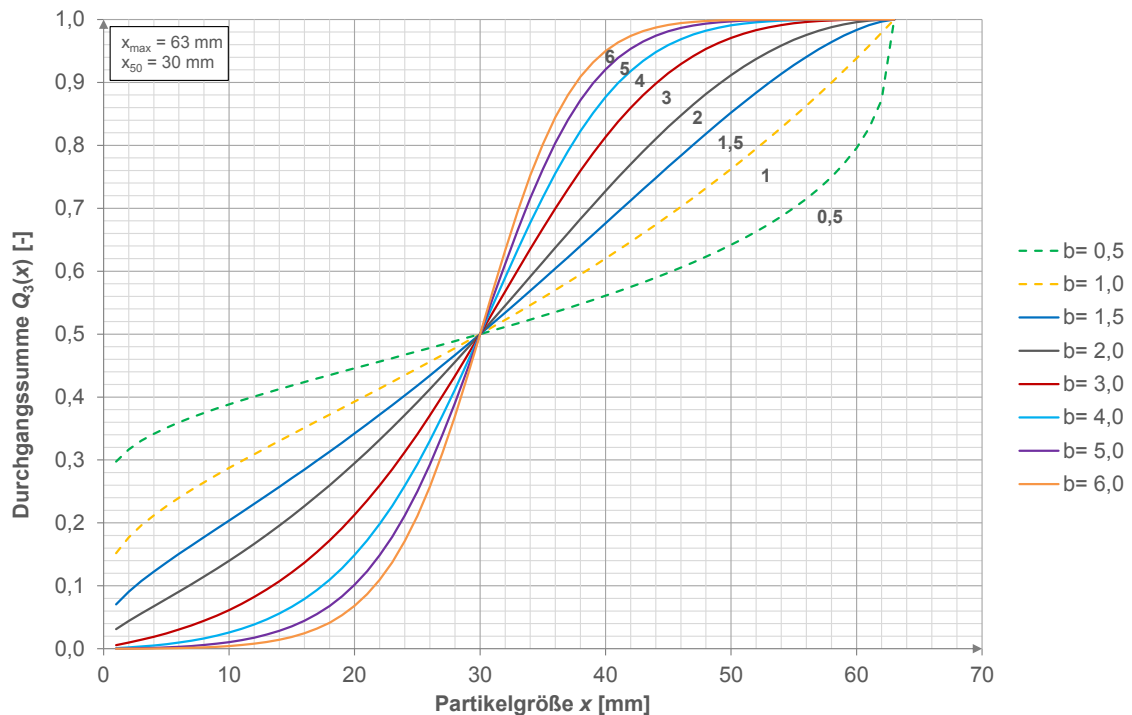


Abbildung 14: Einfluss des Kurvencharakteristikkfaktors b im Wertebereich $b = 0,5 \dots 6$

Die b -Werte der Swebrec-Basisfunktion liegen gemäß den Versuchen von OUCHTERLONY [35] in einem schmalen Bereich zwischen 1 und 4. Verteilungen von Material aus Sprengungen weisen im Allgemeinen einen Wert von 2,5 auf. Selten liegen die b -Werte für ein Sprenghaufwerk unter 1,5. Bei Brechern beträgt der b -Wert üblicherweise 2. Es gibt die Tendenz, dass für ein Material der b -Wert konstant ist, jedoch ist nach OUCHTERLONY [35] b kein Materialparameter. Der b -Wert wird vielmehr auch von der Art des Sprengstoffes bzw. der Art des Brechers und seinen Einstellungen beeinflusst [35].

Weiterhin wurden Untersuchungen am Produkt (Kalkstein) eines Profilwalzenbrechers der Primärbrechstufe mit einer Spaltweite von 250 mm in einem Kalksteinbruch durchgeführt [36]. Das Produkt wurde im Bereich von 8-300 mm gesiebt und die gewonnen Siebdaten anschließend einer Kurvenanpassung mit der Swebrec-Funktion unterzogen. Im Falle eines nicht begrenzten x_{\max} , welches bei den Versuchen zwischen 300 mm bis 508 mm liegt, ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9989 \pm 0,0014$ und ein b -Wert von $2,36 \pm 0,20$. Da ein x_{\max} von bis zu 508 mm bei einer Spaltweite von 250 mm laut OUCHTERLONY [36] nicht realistisch ist, begrenzt er die obere Partikelgröße auf 315 mm und führt erneut eine Kurvenanpassung durch. In diesem Fall ist die Güte der Anpassung $R^2 = 0,9986 \pm 0,0018$ und auch der b -Wert mit $2,26 \pm 0,19$ nur geringfügig niedriger. Demzufolge hat die Wahl einer festen oberen Partikel-

größe nur einen geringen Einfluss auf die Genauigkeit der Kurvenanpassung. Wird für die Kurvenanpassung bei weiterhin konstantem $x_{\max} = 315 \text{ mm}$ auch der Feinanteil ($0 \dots 8 \text{ mm}$) berücksichtigt, so ergibt sich ebenfalls ein hohes Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9974 \pm 0,0034$ und $b = 2,31 \pm 0,11$. OUCHTERLONY [36] sieht dies als Indiz dafür, dass mit diesem b -Wert das Bruchverhalten von Kalkstein in diesem Walzenbrecher beschrieben werden kann. Er fasst weiterhin zusammen, dass die Produktpartikelgrößenverteilung durch die Swebrec-Funktion mit nur einem variablen Parameter x_{50} hinreichend gut beschrieben werden kann. Die anderen beiden Parameter sind dabei festgelegt auf $x_{\max} \approx 315 \text{ mm}$ und $b \approx 2,31$ [36].

Obwohl die hier beschriebenen Verteilungsfunktionen zur Beschreibung der Partikelgrößenverteilung von Brechprodukten aus Walzenbrechern geeignet zu sein scheinen, sind nur wenige funktionale Zusammenhänge von Aufgabe- und Betriebsparametern wie Aufgabepartikelgrößenverteilung, Spaltweite und Walzenumfangsgeschwindigkeit bekannt. Diese basieren auf Ergebnissen von experimentellen Untersuchungen mit einem bestimmten Maschinentyp in bestimmten Wertebereichen der Einstellgrößen. Daher ist eine Extrapolation der Zusammenhänge auf andere Maschinen meist nicht bzw. nur begrenzt zulässig.

b) Bilanzmodelle

Bei der Prognose der Produktpartikelgrößenverteilung mit Hilfe von Bilanzmodellen wird das Aufgabegut in mehrere Partikelgrößenklassen zerlegt und jede Klasse unabhängig von der anderen betrachtet. Für Brecher im Allgemeinen wird meist das WHITEN Brechermodell verwendet [9, S. 49], [37, S. 135-145, 148], [38, S. 18], welches in Abbildung 15 schematisch dargestellt ist. WHITEN teilt den Zerkleinerungsprozess in die zwei Teilfunktionen „Klassieren“ (C) und „Brechen“ (B). Die in den Brechraum eintretenden Partikel f können diesen entweder ungebrochen passieren und direkt in das Produkt p gelangen oder aber gebrochen werden. Werden sie gebrochen, durchlaufen sie anschließend diesen Zyklus erneut, in dem sie klassiert und direkt ins Produkt gelangen oder erneut gebrochen werden.

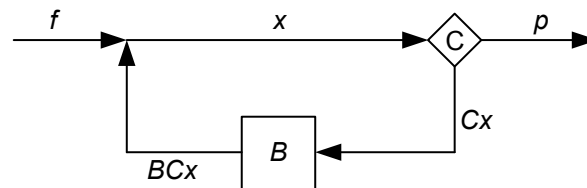


Abbildung 15: Schematische Darstellung des WHITEN Brechermodells, bearbeitet nach WHITEN [39]

Die Vektoren f , x und p geben die Masseanteile der Fraktionen an. Die Bruchfunktion B bestimmt die Verteilung, in welche ein Mutterpartikel gebrochen wird. Die Klassierfunktion C gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der die Partikel in den Brechprozess gelangen. Für die Massebilanz ergeben sich folgende Formeln [39]:

$$f + B \cdot C \cdot x = x \quad (2.32)$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{p} \quad (2.33)$$

Die Eliminierung von \mathbf{x} ergibt:

$$\mathbf{p} = [\mathbf{1} - \mathbf{C}] \cdot [\mathbf{1} - \mathbf{B} \cdot \mathbf{C}]^{-1} \cdot \mathbf{f} \quad (2.34)$$

Mit der Formel (2.34) lässt sich unter Kenntnis der Werte für Klassier- und Bruchfunktion die Produktpartikelgrößenverteilung aus der Aufgabeverteilung berechnen.

Die Klassierfunktion wird durch Formel (2.35) definiert [37, S. 141].

$$\begin{aligned} C(x) &= 0 && \text{für } x \leq k_1 \\ C(x) &= 1 - \left[\frac{k_2 - x}{k_2 - k_1} \right]^{k_3} && \text{für } k_1 < x < k_2 \\ C(x) &= 1 && \text{für } x \geq k_2 \end{aligned} \quad (2.35)$$

Der Parameter k_1 kann für Walzenbrecher der minimalen Spaltweite s_{r2} gleichgesetzt werden ($k_1 = s_{r2}$) und beschreibt die Partikelgröße, unterhalb derer keine Partikel gebrochen werden sollten. Partikel größer bzw. gleich k_2 werden immer gebrochen, wobei k_2 der maximalen Produktpartikelgröße gleichgesetzt werden kann ($k_2 = x_{P,max}$) [37, S. 144]. Der Exponent k_3 ist eine Konstante und nimmt üblicherweise den Wert 2,3 an [37, S. 141].

Darüber hinaus existiert ein von AUSTIN [40] entwickeltes Modell mit höherem Komplexitätsgrad für Glattwalzenbrecher [41]. Dieses erweitert das Modell von WHITEN um einen zusätzlichen Klassierkreislauf (siehe Abbildung 16). Während der Vorklassierung s wird entschieden, ob ein Partikel f in den Brechprozess gelangt oder unzerkleinert im Bypass direkt in das Endprodukt p gelangt. Ein Mutterpartikel fs , welches nicht direkt ins Endprodukt gelangt, wird in mehrere primäre Tochterpartikel p' gebrochen. Tochterpartikel, welche größer als die eingestellte Spaltweite sind, durchlaufen anschließend einen weiteren Klassiervorgang s' (Nachklassierung), bei dem sie entweder erneut gebrochen $p's'$ oder ohne eine weitere Zerkleinerung ins Endprodukt gelangen. Dabei können sich s und s' unterscheiden. Es ist davon auszugehen, dass ein Tochterpartikel, welches beim vorherigen Bruch entsteht, eine günstigere Position besitzt, um erneut gebrochen zu werden, als ein zuvor in den Spalt gefallenes Mutterpartikel [40]. An dieser Stelle wird jedoch nicht weiter auf die mathematische Beschreibung des Modells von AUSTIN [40] eingegangen.

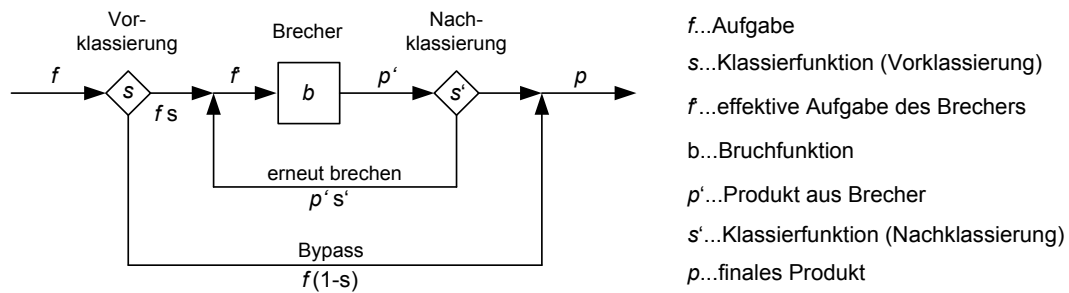


Abbildung 16: Schematische Darstellung des Brechermodells von AUSTIN, bearbeitet nach AUSTIN [40]

Bei Modellen, wie den von WHITEN [39] und AUSTIN [40], wird wie zuvor beschrieben die jeweilige Bruchfunktion der Mutterpartikel benötigt. Diese Bruchfunktion wird experimentell aus der Partikelgrößenverteilung ihrer Bruchstücke ermittelt. Dazu wird u. a. der Drop-Weight-Test [37, S. 76, 78] verwendet, bei dem ein Gewicht bestimmter Masse und Höhe auf ein Mutterpartikel fallen gelassen wird. Dieser Test ist jedoch für die industrielle Anwendung zeitaufwendig. Da er ursprünglich zur Ermittlung der Bruchparameter für AG/SAG Mühlen entwickelt wurde, entspricht die im Test auftretende Schlagbeanspruchung auch nicht der Hauptbeanspruchungsart (Druckbelastung) in Walzenbrechern [42].

2.4 Abschlussbetrachtung und Ableitung der Aufgabenstellung

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die dargestellten Berechnungsansätze zur Prognose des Einzugsverhaltens, des Massedurchsatzes und der Produktpartikelgrößenverteilung wichtige Einflussfaktoren zum Teil nur unzureichend oder gar nicht berücksichtigen. Hinsichtlich des Einzugsverhaltens können mit den vorhandenen Modellen zumindest für Glattwalzenbrecher gute Ergebnisse erzielt werden. Für Profilwalzenbrecher gibt es größere Abweichungen, da insbesondere die Geometrie und Anordnung der Profilierung einen wichtigen Einfluss auf das Einzugsverhalten, vor allem von großen Partikeln, hat. Zur Prognose des Einzugsverhaltens von Überpartikeln, deren Größe größer als die sofort einziehbare Partikelgröße ist, ist bisher wenig bekannt.

Das zur Prognose des Massedurchsatzes verwendete Modell nach Gleichung (2.26) berücksichtigt die Partikelgrößenverteilung des Aufgabegutes nur bedingt. Übergroße Partikel, die nicht sofort eingezogen werden und demzufolge eine bestimmte Zeit oberhalb der Walzen verweilen, haben einen großen Einfluss auf den Durchsatz, werden jedoch in der Gleichung (2.26) nicht berücksichtigt. Das Modell bietet dennoch eine gute Basis zur Weiterentwicklung.

Die bestehenden Bilanzmodelle zur Prognose der Partikelgrößenverteilung des Produktes liefern zwar gute Ergebnisse, doch vor allem die Ermittlung der Bruchfunktion kann für die industrielle Anwendung zu zeitaufwendig sein. Weiterhin entspricht die Beanspruchungsart des zur Ermittlung der Bruchfunktion häufig verwendeten Drop-Weight-Tests nicht der eines Walzenbrechers. Mit der neu entwickelten Swebrec-Funktion sind Partikelgrößenverteilungen von Brechprodukten unterschiedlicher Brecher darstellbar. Das Bestimmtheitsmaß liegt nach OUCHTERLONY [35] dabei in 95 % der Fälle größer als $R^2 = 0,995$. Ein Modell zur Prognose von

Produktpartikelgrößenverteilungen für Walzenbrecher mit der Swebrec-Funktion fehlt jedoch bisher.

Basierend auf den Untersuchungsergebnissen soll diese Arbeit einen Beitrag zu folgenden Thematiken liefern:

- Untersuchung des Einzugsverhaltens bzw. der Verweilzeit von übergroßen Partikeln (als Einzelpartikel und mit nachströmenden Material), deren Größe größer als die sofort einziehbare Partikelgröße ist
- Aufstellen eines verbesserten Modells zur präziseren Prognose des Massedurchsatzes vor allem bei der Aufgabe von übergroßen Partikeln
- Aufstellen eines Modells zur Prognose von Produktpartikelgrößenverteilungen bei Doppelwalzenbrechern unter Verwendung der Swebrec-Funktion

3 Experimentelle Untersuchungen

In diesem Kapitel werden die experimentell durchgeführten Untersuchungen vorgestellt. Zunächst werden der Versuchsstand und die zur Aufnahme der Zielgrößen verwendeten Messverfahren beschrieben. Anschließend erfolgt die Versuchsplanung und Materialcharakterisierung der untersuchten Gesteine. Abschließend wird die Versuchsdurchführung der verschiedenen Versuchspunkte erläutert.

3.1 Versuchsstand Doppelwalzenbrecher

3.1.1 Grundlegender Aufbau des Versuchsstandes

Für die Untersuchungen kommt eine Brechanlage im halbindustriellen Maßstab zum Einsatz, um belastbare Ergebnisse zur Entwicklung von praxisnahen Auslegungsmodellen zu generieren. Die Abbildung 17 zeigt schematisch den Aufbau. Die Anlage besteht aus drei Hauptkomponenten. Die Aufgabeeinrichtung (1) setzt sich aus Bunker (ca. 14 m³ Fassungsvermögen) und einem Abzugsband zusammen. Der Aufgabebunker wird mit Hilfe eines Tieflöffelbaggers beschickt. Das Abzugsband kann über eine Kabelfernbedienung stufenlos in der Geschwindigkeit von 0...1 m/s reguliert werden, sodass die dem Brecher zugeführte Materialmenge variabel ist.

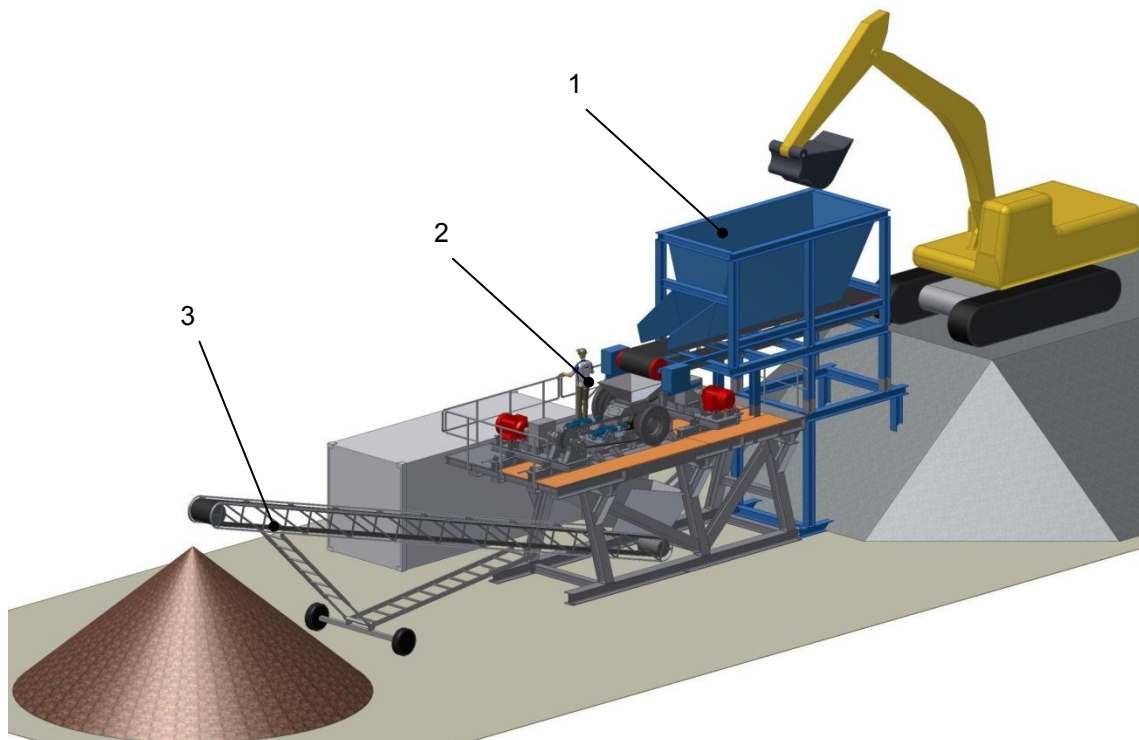


Abbildung 17: Schematische Darstellung der Versuchsanlage mit den Hauptkomponenten

1 Aufgabeeinrichtung, 2 Walzenbrecher mit Einlauftrichter und 3 Abfördereinrichtung

Zur Vergleichmäßigung der Materialaufgabe in den Brecher (2) ist über dem Bunkerabzugsband ein höhenverstellbares Abstreifblech installiert. Nach Abwurf des Materials vom Bunkerabzugsband fällt es in die Einlauföffnung des Brechers. Damit das Material beim Fallen

nicht „breitläuft“ und an den Schrägen des Einlaufrichters auftrifft und abbremsst, wird es während des Falls geleitet. Dies geschieht mit zwei Leitelementen, die vom Abwurfpunkt bis in den Brechereinlauf reichen (siehe Abbildung 18).



Abbildung 18: Leitelemente vom Abwurfpunkt des Bunkerabzugsbandes bis zum Brechereinlauf

Anschließend erfolgt die Zerkleinerung des Materials im Walzenbrecher. Auf die zur Erfassung von Messgrößen des Brechers verwendete Messtechnik wird im nachfolgenden Kapitel 3.1.2 näher eingegangen. Das im Walzenbrecher gebrochene Material wird mit einem gemuldeten Gurtbandförderer (3) abtransportiert und auf einer Halde aufgeschüttet. Der Massedurchsatz wird hierbei durch eine im Abförderband integrierte Bandwaage erfasst. Die Bandwaage besteht aus einer Vollbrücken-DMS-Wägezelle und einem Geschwindigkeitsmessrad. Sie ist am Ende des ersten Drittels des Bandes eingebaut, sodass sie weit genug vom Materialaufgabebereich entfernt liegt. Da die Bandwaage in einen bereits bestehenden Gurtbandförderer eingebaut wurde, muss sie vor Beginn der Versuche kalibriert werden (siehe Kapitel 3.1.4).

3.1.2 Aufbau des Walzenbrechers und verwendete Messtechnik

Kern der Versuchsanlage ist ein Doppelwalzenbrecher vom Typ DRC 450x450. Die Abbildung 19 zeigt eine 3D-Ansicht des Brechers ohne Antriebseinheit bzw. Einlaufrichter. Es handelt sich nach Abbildung 8 aus Kapitel 2.2.2 um einen Profilwalzenbrecher mit einem Längendurchmesser-Verhältnis von $\lambda = 1,2$. Der Walzenbrecher besitzt zwei Walzen zylindrischer Form, die als Fest- (2) und Loswalze (4) ausgeführt sind. Die Umfangsgeschwindigkeit der beiden gegenläufig rotierenden Walzen kann mittels Frequenzumrichter von 0...8 m/s variiert werden. Die Loswalze ist in horizontaler Richtung verschiebbar gelagert. Der Lagerbock sitzt dazu in Gleitschienen, welche auf dem Grundrahmen aufgeschraubt sind. Vorgespannt wird die Loswalze mit zwei Hydraulikzylindern (3), die sie gegen Abstandshalter drückt, welche sich am Lagerbock der Festwalze abstützen. Die Zylinder sind über Kreuz verschaltet, um ein paralleles Ausweichen der Loswalze bei Überbelastung zu gewährleisten. Die Spaltverstellung (5) erfolgt

mittels Beilegblechen zwischen dem Lagerbock der Festwalze und dem Lagerbock der Loswalze. Die beiden Walzen werden jeweils separat von einem Elektromotor und einem vorgeschaltetem Getriebe über Keilriemen angetrieben.

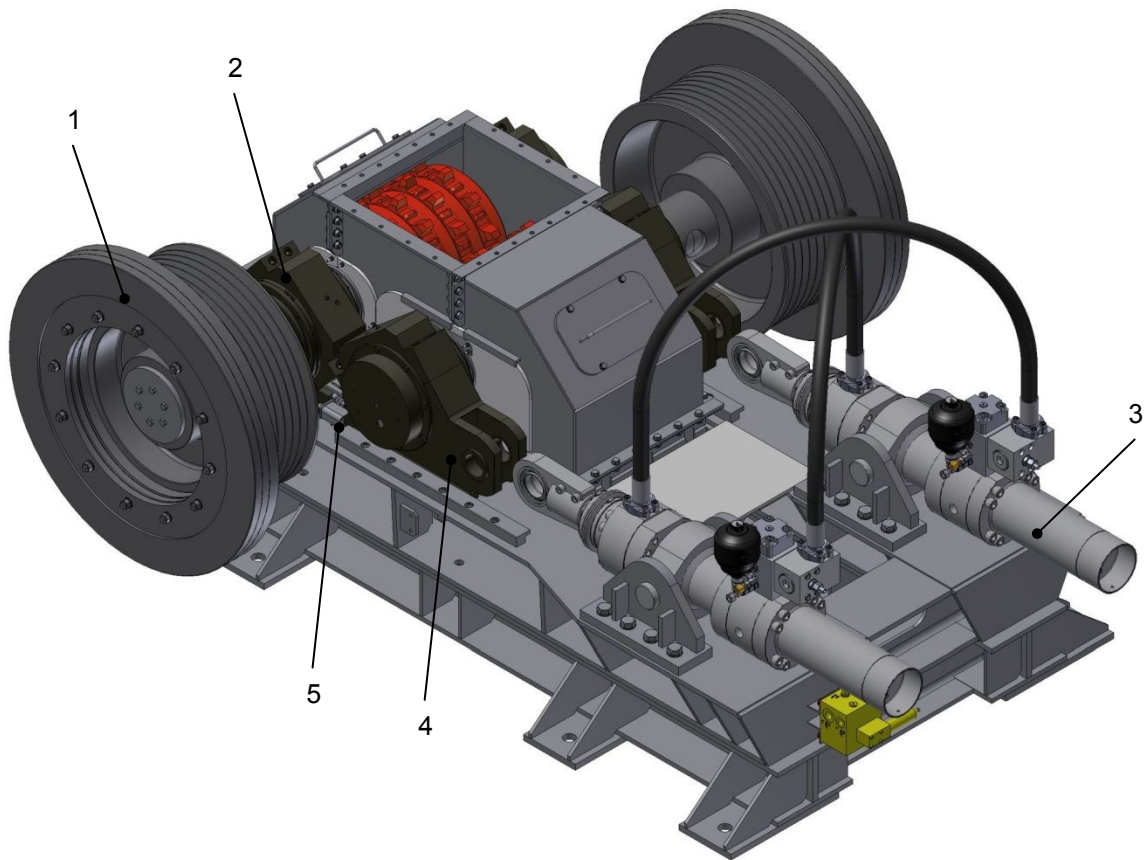


Abbildung 19: Gesamtansicht des Walzenbrechers mit den Hauptkomponenten

(1) Riemenscheibe mit Schwungmasse, (2) Lagerbock der Festwalze (FW), (3) Hydraulikzylinder mit Kreuzschaltung, (4) Lagerbock der Loswalze (LW), (5) Spaltverstellung

An den Antriebsscheiben (1) lassen sich mehrere Schwunggewichte montieren und somit die Schwungmasse verändern, wobei diese Möglichkeit während der Versuche nicht genutzt wurde. Die technischen Daten sowie der Betriebsbereich des Walzenbrechers sind in der Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Technische Daten des Versuchswalzenbrechers

Eigenschaft/Kennwert	Wertebereich
Typ	DRC 450x450
Walzendurchmesser D_S (Zahnspitze)	450 mm
Walzenlänge L_W	450 mm
Spaltweite s_{r5}	50...90 mm
Walzenumfangsgeschwindigkeit v_U (an Zahnspitze)	0...8 m/s

Der ordnungsgemäße Betrieb des Brechers bzw. die Einhaltung der Betriebsbereiche werden durch die Messung der folgenden Größen überwacht:

- Messung beider Walzendrehzahlen durch inkrementelle Drehgeber
- Messung der elektrischen Leistungsaufnahme durch den Frequenzumrichter
- Messung des Hydraulikdrucks und Verfahrweg beider Hydraulikzylinder durch elektronische Druckschalter bzw. magnetostriktive Positionssensoren direkt im Zylinder
- Kameraaufzeichnung des Brechereinflaßs

Die oben genannten Messdaten sowie die Daten der Bandwaage (siehe Kapitel 3.1.4) werden mit einer Abtastrate von 2000 Hz zur späteren Auswertung aufgezeichnet.

3.1.3 Brechwalzen und Profilierung

Die Brechwalzen, siehe Abbildung 20, sind bei dem in dieser Arbeit verwendeten Walzenbrecher als Profilwalzen ausgeführt. Die technischen Daten einer Brechwalze sind der Tabelle 3 des vorigen Kapitels zu entnehmen. Im Gegensatz zur üblichen Bauweise von Walzenbrechern im Industriemaßstab (Walzengrundkörper in Trommelbauweise mit auswechselbaren Brechplatten) ist die Brechwalze des Versuchsbrechers als Vollwelle, bestückt mit ringförmigen Brechwerkzeugen, ausgebildet. Eine Brechwalze ist mit Zahnringen und glatten Zwischenringen ausgestattet. Ein Zahnring ist mit Zähnen und kleineren Nocken besetzt.

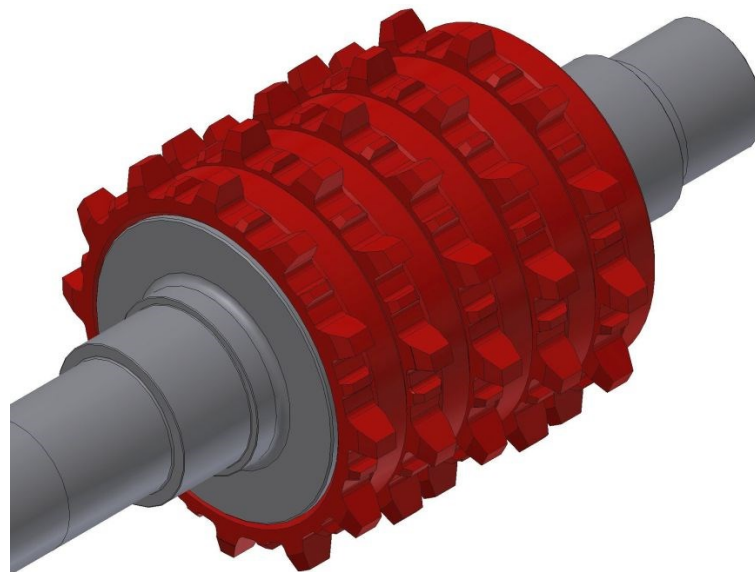


Abbildung 20: 3D-Darstellung einer Brechwalze des Versuchswalzenbrechers, bestehend aus Zahn- und glatten Zwischenringen

Die Ringe sind aus einem verschleißbeständigen Stahl gefertigt und auf der Vollwelle festgeschweißt. Die Walze weist gemäß Abbildung 5 (siehe Kapitel 2.2.1) eine reguläre, versetzte Werkzeugformation auf, bei der die Werkzeuge schachbrettförmig angeordnet sind. Demzufolge fluchtet jeweils der nächste Zahnring mit einem seiner Zähne axial zu einer Nocke des vorigen Zahnringes. Somit fluchten beispielsweise die Zähne des ersten, dritten und fünften Zahnringes axial miteinander. Die Werkzeuggeometrie ist daher gemäß Abbildung 7 (siehe Kapitel 2.2.1)

als nicht umlaufend ($\alpha_{We}/360^\circ < 1$) und nicht durchgängig ($l_{We}/L_{We} < 1$) einzustufen. Die Werkzeugform wird nach dem Verhältnis h_{We}/R_W als Zahn eingestuft.

3.1.4 Kalibrierung der Bandwaage

Da die Bandwaage kein Komplettsystem darstellt, sondern als Wägeeinheit in einen vorhandenen Förderer eingebaut ist, kann diese nicht herstellerseitig kalibriert werden [43]. Weiterhin ist aufgrund variierender Beladung des Abförderbandes auch eine unterschiedliche Durchbiegung zu erwarten. Diese Punkte machen eine Kalibrierung der Waage vor Ort notwendig, sodass eine beladungsabhängige Kalibrierung durchgeführt wird. Dabei wird der Istwert der Bandwaage mit dem Sollwert bei unterschiedlichen Beladungsstufen des Bandes verglichen. Die Kennlinie der Bandwaage wird vor den Versuchen einmalig eingestellt und während der Kalibrierung sowie für alle nachfolgenden Versuche nicht verstellt.

Eine Kalibrierung läuft wie folgt ab: Pro Beladungsstufe (verstellt über die Geschwindigkeit des Beschickungsförderers) wird eine Masse von 9...13 t des immer gleichen Materials (Kalkstein) durch den Brecher (ohne Zerkleinerungswirkung) und folglich über den Abzugsförderer mit Bandwaage auf einen LKW geleitet. Mit dem LKW wird der Sollwert m_{soll} der geförderten Masse festgestellt (LKW-Prüfwaage) während die Bandwaage die Masse des Istwertes m_{ist} zählt. Weiterhin wird während eines Versuchs der von der Bandwaage ausgegebene Durchsatz in t/h im Datenerfassungsprogramm aufgezeichnet. Dieses Vorgehen wird für verschiedene Beladungsstufen von ca. 100...700 t/h jeweils zweimal pro Beladungsstufe durchgeführt.

Es werden insgesamt zwei Kalibrierungen im Abstand von mehreren Monaten durchgeführt. Störgrößen wie die Temperatur des Gurtes und weitere Größen können dabei nicht berücksichtigt werden.

Für die Auswertung der Kalibrierungsversuche wird die mittlere relative Abweichung zwischen Ist- und Sollwert einer Beladungsstufe berechnet (Mittelung aus den Wiederholungen), siehe Gleichung (3.1).

$$\begin{array}{l} \text{Rel. Abweichung} \\ \text{der Bandwaage} \end{array} \quad \Delta_{BW,rel} = \left(\frac{m_{ist}}{m_{soll}} \cdot 100 \% \right) - 100 \% \quad (3.1)$$

Aus der Aufzeichnung des Massedurchsatzes im Datenerfassungsprogramm wird der Mittelwert des fehlerbehafteten, gemessenen Durchsatzes \dot{m}_{Mess} dieser Beladungsstufe ermittelt. Die zuvor berechnete mittlere relative Abweichung wird nun über dem Mittelwert des gemessenen Durchsatzes in einem Diagramm aufgetragen. Da zwei Kalibrierungen durchgeführt werden, ergeben sich folglich zwei Kalibrierungskurven, welche gemittelt werden. Diese gemittelte Kalibrierungskurve zeigt Abbildung 21. Die einzelnen Kurven der beiden Kalibrierungsversuche sind der Abbildung 68 im Anhang A zu entnehmen.

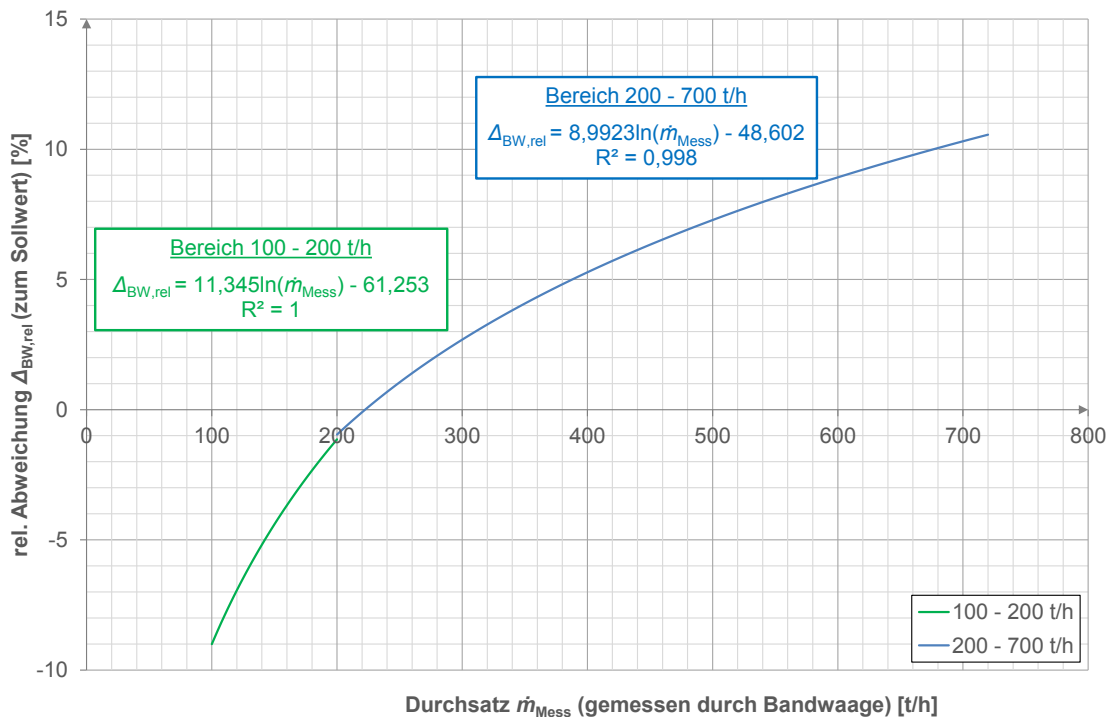


Abbildung 21: Relative Abweichung $\Delta_{BW,rel}$ der Bandwaage zum Sollwert in Abhängigkeit des fehlerbehafteten, gemessenen Durchsatzes \dot{m}_{Mess} der Bandwaage

Die Kalibrierkurve gibt an, wie groß die relative Abweichung $\Delta_{BW,rel}$ des Zählwertes der Bandwaage zum Sollwert in Abhängigkeit des vom Messdatenerfassungssystem aufgezeichneten fehlerbehafteten Durchsatzes \dot{m}_{Mess} ist. Beispielsweise liegt der Anzeigewert der Bandwaage bei einem gemessenen Massestrom von 600 t/h um 9 % zu hoch.

Die Kalibrierkurve hat bei ca. 220 t/h einen Nulldurchgang, da die Parameter für die Kennlinie der Bandwaage ursprünglich auf diesen Durchsatz eingestellt wurden. Daher ergeben sich vereinfacht auch zwei Bereiche von 100...200 t/h und 200...700 t/h. Diese beiden Bereiche werden getrennt voneinander approximiert, da sich somit ein höheres Bestimmtheitsmaß R^2 ergibt. Dadurch entsteht an der Stelle 200 t/h ein Sprung (Funktionen gehen nicht stetig ineinander über). Der daraus resultierende Fehler im Bereich um 200 t/h ist jedoch geringer als bei einer Approximation über alle Punkte.

Um nun den korrekten Massedurchsatz \dot{m} zu erhalten, muss jeder fehlerbehaftete, gemessene Durchsatzwert \dot{m}_{Mess} nach Gleichung (3.2) korrigiert werden.

Korrigierter
Massedurchsatz

$$\dot{m} = \dot{m}_{Mess} \cdot k_{BW} \quad (3.2)$$

Der Korrekturfaktor k_{BW} errechnet sich wie folgt nach Gleichung (3.3).

Korrekturfaktor
Bandwaage

$$k_{BW} = \frac{m_{soll}}{m_{ist}} \quad (3.3)$$

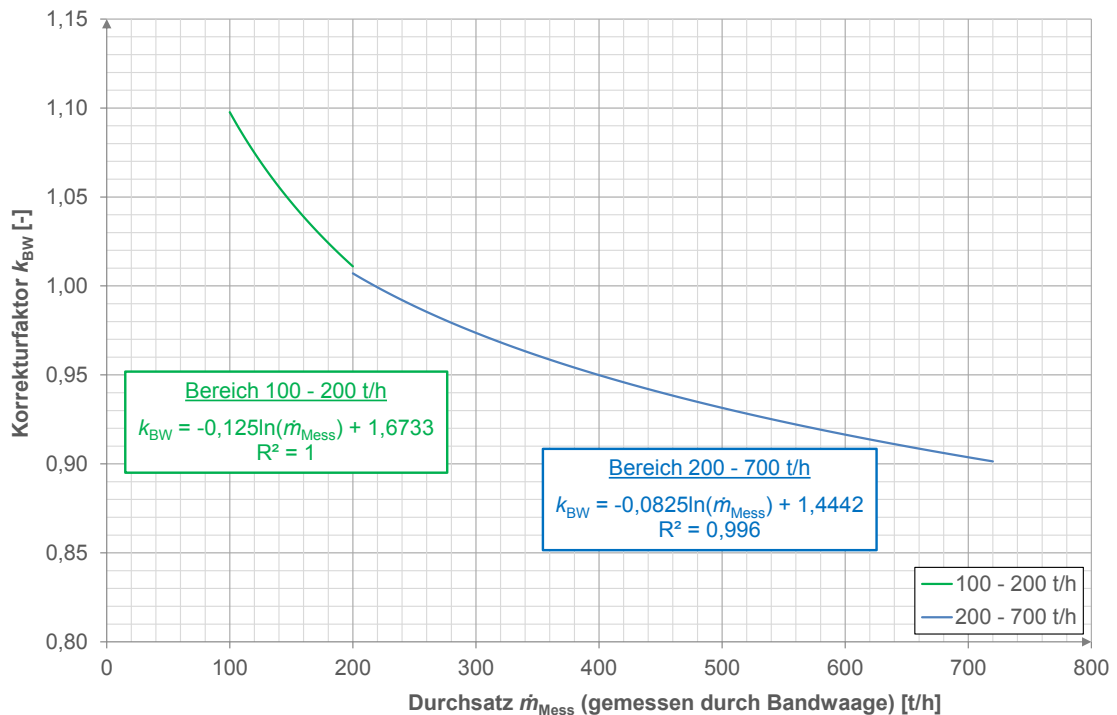


Abbildung 22: Korrekturfaktor k_{BW} in Abhängigkeit des fehlerbehafteten Durchsatzwertes \dot{m}_{Mess} der Bandwaage

Die Abbildung 22 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Korrekturfaktor und dem fehlerbehafteten Massedurchsatz der Bandwaage. Auch hier ergibt sich an der Stelle 200 t/h die bereits angesprochene Unstetigkeit bei dem Übergang der beiden Bereiche.

Für die spätere Korrektur des Massedurchsatzes wird der Korrekturfaktor in Abhängigkeit des gemessenen Durchsatzes nach den folgenden Formeln berechnet.

Korrekturfaktor
 100 – 200 t/h

$$k_{BW} = -0,125 \cdot \ln(\dot{m}_{Mess}) + 1,6733 \quad (3.4)$$

Korrekturfaktor
 200 – 700 t/h

$$k_{BW} = -0,0825 \cdot \ln(\dot{m}_{Mess}) + 1,4442 \quad (3.5)$$

3.2 Versuchsprogramm

In diesem Kapitel wird das durchgeführte Versuchsprogramm vorgestellt. Im Rahmen dieser Arbeit sind die in Tabelle 4 dargestellten Einflussgrößen experimentell untersucht und in mehreren Stufen variiert worden.

Tabelle 4: Experimentell untersuchte Einflussgrößen und ihr Wertebereich

Art	Einflussgröße		Wertebereich
Aufgabe- parameter	Partikelgrößenverteilung	Einzelfraktion	3/32 mm, 32/63 mm, 60/120 mm, 120/160 mm, 160/200 mm, 200/250 mm
		Mischung* (aus Einzelfraktionen)	1-2-1, 1-1-4
	Druckfestigkeit σ_D		Kalkstein, Andesit, Diabas
Maschinen- parameter	Walzenumfangsgeschwindigkeit** v_U		2 m/s, 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s
	Walzenspalt s_{r5}		50 mm, 70 mm, 90 mm

* Bedeutung z. B. der Mischung 1-2-1: 25 % Fraktion 3/32 mm, 50 % Fraktion 32/63 mm und 25 % Fraktion 60/120 mm

** bezieht sich auf den Spitzenkreisdurchmesser einer Walze

Für die Partikelgrößenverteilung eines Materials werden unterschiedliche Einzelfraktionen untersucht. Die Fraktionen 3/32 mm, 32/63 mm und 60/120 mm sind lieferbare Partikelgrößenklassen von Herstellern, wobei die Bezeichnungen der Fraktionen nur Nenngrößen sind. Die größeren Fraktionen von 120 mm bis 250 mm werden als Überpartikel deklariert und mittels Durchstecksiebung manuell klassiert.

Die drei gewählten Materialien unterscheiden sich maßgeblich in ihrer Druckfestigkeit. Nähere Informationen zu den Eigenschaften der Materialien finden sich in Kapitel 3.3. Neben den Einzelfraktionen werden auch Mischungen getestet, eine grobe Mischung der Bezeichnung 1-1-4 und eine mittelgrobe mit der Bezeichnung 1-2-1. Diese bestehen aus den drei Lieferfraktionen in unterschiedlichen Mengenverhältnissen. Eine Mischung der Bezeichnung „1-2-1“ besteht zu einem Teil (25 %) aus der Fraktion 3/32 mm, zu zwei Teilen (50 %) aus der Fraktion 32/63 mm und zu einem Teil (25 %) aus der Fraktion 60/120 mm. Die Mischung „1-1-4“ setzt sich entsprechend dazu zusammen.

Weiterhin werden Walzenumfangsgeschwindigkeiten von 2 m/s bis 8 m/s untersucht, welche zum Teil über den üblichen Betriebsbereich von Doppelwalzenbrechern der Primärbrechstufe hinaus reichen. Die Spaltweite s_{r5} wird in den drei Stufen zu 50 mm, 70 mm und 90 mm variiert.

Der Großteil der Versuche wird mit Kalkstein durchgeführt. Einige Vergleichsversuche finden mit Andesit und Diabas statt, da diese die gewünschten anderen Festigkeitseigenschaften aufweisen.

In Abbildung 23 ist der Versuchsplan der experimentellen Untersuchungen dargestellt. Jedes „x“ steht für einen untersuchten Versuchspunkt. Für Kalkstein ergeben sich insgesamt 48, für Andesit 10 und für Diabas lediglich 4 Versuchspunkte. Für jeden Versuchspunkt werden mindestens 3 bis 5 Wiederholungen durchgeführt.

Spalt [mm]	Walzenumfangs- geschwindigkeit [m/s]	Einzelfraktionen [mm]						Mischungen (f-m-g)	
		(f) 3/32	(m) 32/63	(g) 60/120	120/160	160/200	200/250	1-2-1	1-1-4
50	2	x	x x x	x	-	-	-	-	-
	4	x	x x x	x x	x	x	x	x	x
	6	x	x x x	x	-	-	-	-	-
	8	x	x x x	x	-	-	-	-	-
70	2	x	x	x	-	-	-	-	-
	4	x	x	x x	x	x	x	x	x
	6	x	x	x	-	-	-	-	-
	8	- ¹⁾	x	x	-	-	-	-	-
90	2	x	x	x x	-	-	-	-	-
	4	x	x	x x	x	x	x	x	x
	6	- ¹⁾	x	x x	-	-	-	-	-
	8	- ¹⁾	x	x x	-	-	-	-	-
- ¹⁾ ... nicht durchführbar						Legende: x...Kalkstein x...Andesit x...Diabas			

Abbildung 23: Versuchsplan der experimentellen Untersuchungen, Fraktionsgrößen der Einzelfraktionen sind Nennangaben

Die mit „-“ gekennzeichneten Parameterkombinationen werden aufgrund des damit verbundenen hohen Versuchsaufwandes nicht durchgeführt. Versuchspunkte mit der Bezeichnung „-¹⁾“ können aufgrund eines zu großen maximalen Durchsatzes nicht untersucht werden, da dieser die Kapazität des Abzugsförderers überschreiten würde.

3.3 Charakterisierung der Aufgabematerialien

In diesem Kapitel werden die Versuchsmaterialien u. a. hinsichtlich ihrer Druckfestigkeit, ihrer Dichte und des granulometrischen Zustandes charakterisiert.

Wie in Tabelle 4 bereits erwähnt, werden Kalkstein, Andesit und Diabas als Versuchsmaterial verwendet. Die Herkunft der Gesteine kann Tabelle 5 entnommen werden.

Tabelle 5: Herkunft der verschiedenen Versuchsmaterialien

Gestein	Herkunft/Lagerstätte
Kalkstein	Briloner Hartsteinwerk, Steinbruch Brilon
Andesit	Cronenberger Steinindustrie, Steinbruch Mammendorf
Diabas	Mitteldeutsche Hartstein-Industrie, Steinbruch Hildfeld

3.3.1 Druckfestigkeit

Die Ermittlung der Druckfestigkeit eines Gesteins kann mit unterschiedlichen Verfahren erfolgen. Im Allgemeinen wird dafür der einaxiale Druckversuch nach DIN EN 126 [44] herangezogen. Bei diesem werden zylindrische oder würfelförmige Probenkörper zwischen zwei parallelen Platten bis zum Bruch belastet. Aufgrund der aufwendigen Probenkörpervorbereitung ist dieser Test kosten- und zeitintensiv und durch die daraus resultierende geringe Probenanzahl fehlerbehaftet.

Weiterhin kann zur Klassifizierung der Gesteinsfestigkeit der Point-Load-Test (PLT) nach ISRM [45] verwendet werden [46] [47]. Der Vorteil dieses Tests liegt im deutlich reduzierten Aufwand der Vorbereitung der Gesteinsproben. Hier werden die Probekörper in einem tragbaren Handgerät zwischen zwei abgerundeten Kegelspitzen bis zum Bruch belastet. Die Probekörper können ebenfalls reguläre Formen, wie Bohrkern, aber auch unregelmäßig geformte Handstücke sein. Diese sollten einen großen Bruchflächenbereich abdecken. Da der gemessene Festigkeitsindex I_S in hohem Maße von der absoluten Größe der Prüfkörper abhängig ist (genannt Maßstabseffekt [48]), müssen die Einzelwerte auf einen Standarddurchmesser umgerechnet werden. Als Ergebnis der Auswertung ergibt sich der sogenannte Punktlastindex $I_{S(50)}$ als Maß für die Gesteinsfestigkeit. Wird der Punktlastindex mit einem Umrechnungsfaktor c multipliziert, kann die einaxiale Druckfestigkeit σ_D nach Gleichung (3.6) abgeschätzt werden.

$$\text{Einaxiale Druckfestigkeit} \quad \sigma_D = c \cdot I_{S(50)} \quad (3.6)$$

Der Umrechnungsfaktor c ist maßgeblich vom Gestein abhängig. In der Literatur wird beispielsweise $c = 10 \dots 40$ [49] oder im Fall der ISRM $c = 20 \dots 25$ [45] angegeben. POPOV [50] untersuchte in seiner Arbeit mehrere Gesteine, u. a. Andesit, Diabas und Kalkstein, hinsichtlich der einaxialen Druckfestigkeit σ_D und dem PLT-Index $I_{S(50)}$. Er ermittelt einen mittleren Umrechnungsfaktor von $c = 25$.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Gesteinsfestigkeit mit dem Point-Load-Test charakterisiert. Die Anzahl an beprobten Handstücken beträgt mindestens 30 bis maximal 60 Probekörper. Der Punktlastindex $I_{S(50)}$ wird nach RAAZ [51] ermittelt.

Die Versuche mit Kalkstein erstrecken sich über einen längeren Zeitraum. Daher werden insgesamt sechs PLT nach ISRM [45] für Kalkstein durchgeführt. Für Andesit und Diabas wird aufgrund des Materialbedarfs von einer Charge nur ein Test pro Gestein nach ISRM [45] durchgeführt. Die Tabelle 6 fasst die Ergebnisse der PLT zusammen. Die Ergebnisse der Einzeltests für Kalkstein sind in der Tabelle 27 im Anhang B dargestellt.

Tabelle 6: Materialfestigkeiten, charakterisiert durch Punktlastindex \pm Standardabweichung, nach ISRM [45] mit Umrechnungsfaktor $c = 25$

Material	Punktlastindex $I_{S(50)} \pm \sigma$ [MPa]	einaxiale Druckfestigkeit σ_D [MPa]
Kalkstein	$3,86 \pm 1,06$	97 ± 27
Andesit	$5,84 \pm 1,41$	146 ± 35
Diabas	$7,33 \pm 1,65$	183 ± 41

Die Tabelle 6 zeigt, dass die drei Gesteine eine einaxiale Druckfestigkeit zwischen ca. 100 MPa und 180 MPa besitzen und sich damit deutlich unterscheiden. Nach ISRM [52] ist der Kalkstein damit den Gesteinen hoher Festigkeit, der Andesit und Diabas den Gesteinen sehr hoher Festigkeit zuzuordnen (siehe Abbildung 24).

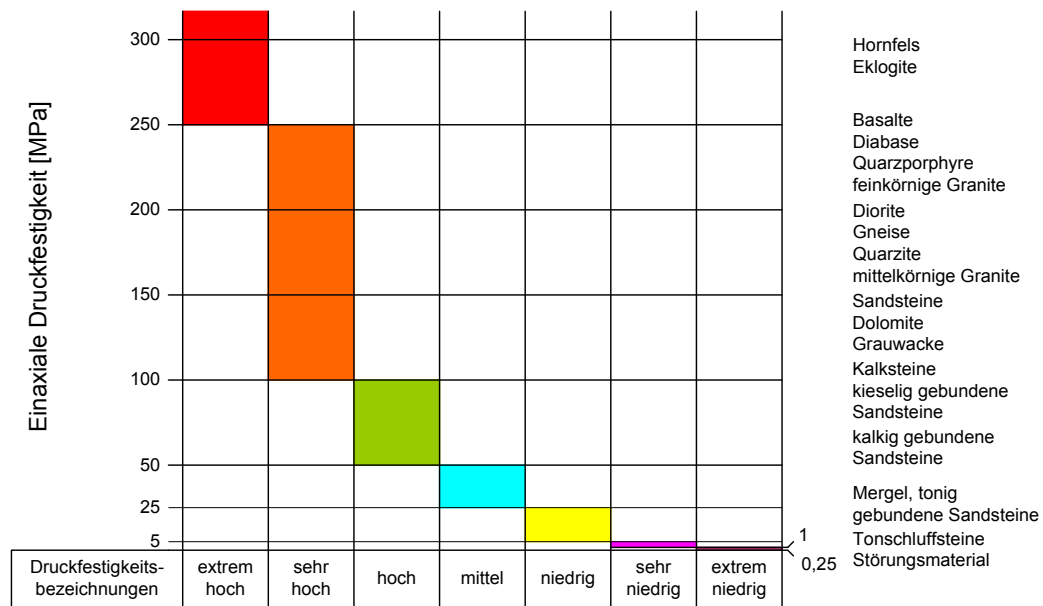


Abbildung 24: Gebräuchliche Bezeichnungen für die einaxiale Druckfestigkeit von Gesteinen nach Empfehlungen der ISRM [52] mit einigen Beispielen nach Popov [50]

3.3.2 Partikelgrößenverteilung

Die Charakterisierung der Aufgabematerialien hinsichtlich ihres granulometrischen Zustandes erfolgt durch eine Prüfsiebung angelehnt an DIN EN 933-1 [53]. Die Vorgehensweise der Prüfsiebung des Aufgabematerials ist dieselbe wie die der Zerkleinerungsprodukte (siehe Kapitel 4.2). Ziel der Materialauswahl ist es, möglichst vergleichbare Partikelgrößenverteilungen (PGV) der jeweiligen Fraktionen sicherzustellen. Die Abbildung 25 zeigt die Partikelgrößenverteilung der Materialien in ihren verschiedenen Einzelfraktionen.

Um die Partikelgrößenverteilung nicht nur qualitativ beurteilen zu können, werden quantitative Kennwerte hinzugezogen. Die Verteilungsbreite einer Fraktion kann mit den Parametern x_5 und x_{95} beschrieben werden. Der x_{50} -Wert gibt Aufschluss über die Lage der Verteilung [54]. Diese drei charakteristischen Kennwerte sind der Tabelle 7 zu entnehmen.

Aus der Abbildung 25 und Tabelle 7 geht hervor, dass sich die drei gewählten Fraktionen deutlich in ihrer Verteilung unterscheiden. Dies zeigt u. a. der Lageparameter x_{50} , welcher einen Bereich von ca. 15 mm bis 72 mm aufweist.

Die Kurven der Fraktion 32/63 mm der drei unterschiedlichen Materialien liegen vor allem im groben Bereich nah beieinander. Der x_{50} -Wert liegt bei ca. 38 mm bis 40 mm und der x_{95} -Wert zwischen 59 mm und 61 mm. Im Bereich $x > 25$ mm ist der Kalkstein tendenziell am größten. Im Bereich $x < 25$ mm kehrt sich die Reihenfolge um. Die Kurve der Kalksteinfraktion liegt hier signifikant über den anderen. Sie weist gegenüber Andesit und Diabas ($Q_3(x < 22,4 \text{ mm}) \approx 4 \%$) einen Feinanteil von 9 % auf. Den höheren Feinanteil zeigen auch die x_5 -Werte, die bei Kalkstein 8,6 mm und im Fall von Andesit bzw. Diabas ca. 23,0 mm betragen. Dies ist damit zu begründen, dass die Fraktionen von Andesit und Diabas Körnungen für Gleisschotter sind,

welche bestimmten Qualitätsanforderungen nach DIN EN 13450 [55] genügen müssen. Die Kalksteinfraktion unterliegt dagegen keinen Qualitätskriterien. Trotz der Abweichung im Feinbereich wird von einer Vergleichbarkeit der drei Materialien hinsichtlich ihrer Partikelgrößenverteilung ausgegangen. Die Schwankungsbreite, dargestellt durch die Standardabweichung, ist bei der Fraktion 32/63 mm niedriger als bei den anderen.

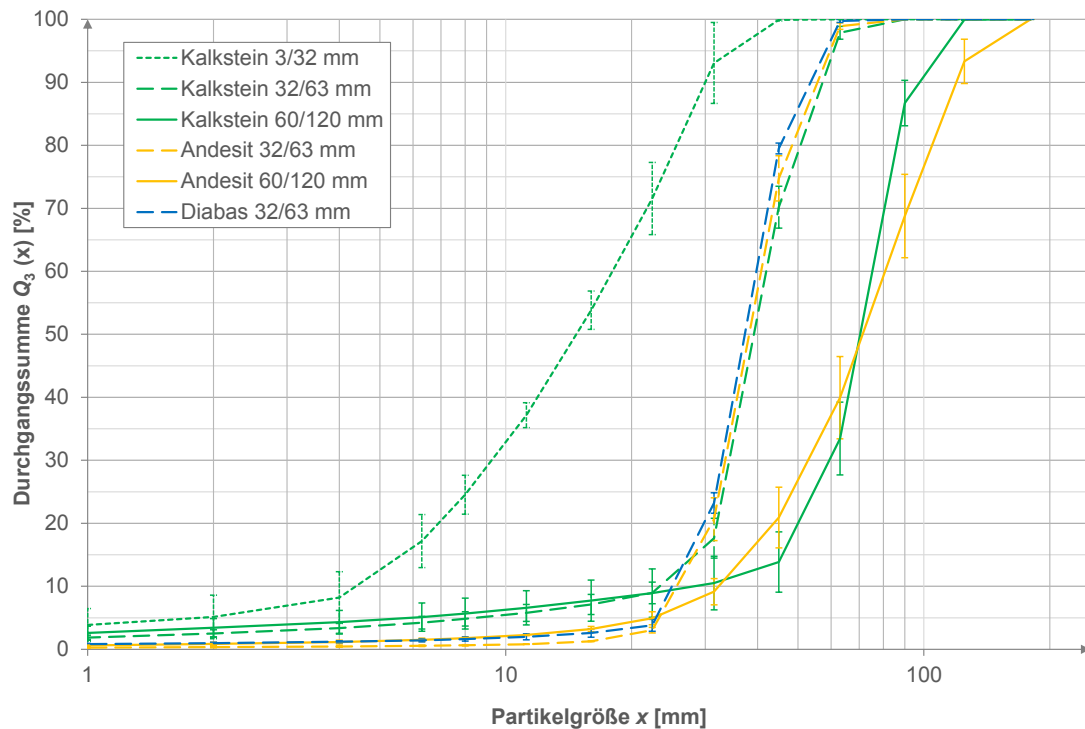


Abbildung 25: Partikelgrößenverteilung der verschiedenen Aufgabematerialien unterschiedlicher Einzelfraktionen, Fehlerbalken in eine Richtung entspricht der einfachen Standardabweichung

Tabelle 7: Charakteristische Parameter der Verteilungskurven der Aufgabematerialien unterschiedlicher Fraktionen

Material	Fraktion/ Mischung [mm]	$x_{A,5}$ [mm]	$x_{A,50}$ [mm]	$x_{A,95}$ [mm]	$x_{A,max}$ [mm]
Kalkstein	3/32	1,9	14,9	35,3	45,0
	32/63	8,6	39,8	61,1	90,0
	60/120	6,0	71,4	111,9	125,0
	1-2-1	4,2*	38,7*	86,9*	125,0
	1-1-4	4,2*	57,6*	105,3*	125,0
Andesit	32/63	23,4	38,8	60,1	90,0
	60/120	22,5	72,4	138,8	180,0
Diabas	32/63	23,0	37,9	58,8	90,0

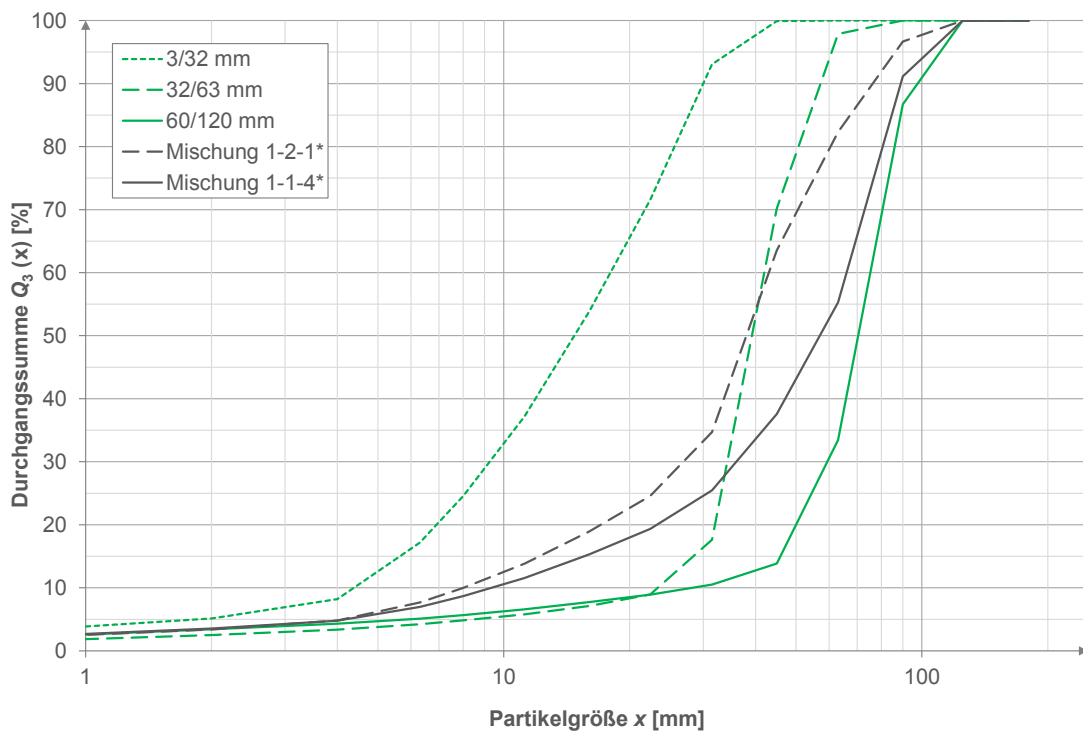
*Werte aus errechneter PGV ermittelt

Die Verteilung der Fraktion 60/120 mm von Kalkstein und Diabas unterscheidet sich, obwohl der $x_{A,50}$ -Wert bei beiden ca. 72 mm beträgt. Im Bereich $x > 70$ mm ist der Andesit deutlich größer verteilt. Vor allem die maximale Partikelgröße von Andesit ($x_{A,max} = 180$ mm) liegt über

der des Kalksteines ($x_{A,max} = 125 \text{ mm}$). Ähnlich der Fraktion 32/63 mm hat der Kalkstein auch bei 60/120 mm einen erhöhten Anteil an Material im Feinbereich gegenüber dem Andesit. Beide Verteilungsfunktionen weisen größere Schwankungsbreiten auf als die anderen Fraktionen.

Für die Einzelfractionen 160 bis 250 mm gibt es keine Verteilungsfunktionen, da diese Fraktionen per Hand ausgelesen werden. Dabei werden pro Fraktion nur zwei Maschenweiten eingesetzt, welche gleichzeitig die untere bzw. obere Partikelgrößengrenze kennzeichnen.

Die Partikelgrößenverteilungen der zwei Mischungen 1-2-1 und 1-1-4 für Kalkstein sind aus den Verteilungen der Einzelfractionen errechnet und in Abbildung 26 dargestellt. Um diese besser einordnen zu können, sind auch die Einzelfractionen des Kalksteins eingezeichnet. Da eine Probenahme der Mischungen aufgrund der großen benötigten Probenmasse, bedingt durch die große obere Partikelgröße infolge der Fraktion 60/120 mm, sehr aufwändig ist, wird die Partikelgrößenverteilung rechnerisch aus den Einzelfractionen ermittelt. Auch die charakteristischen Kennwerte sind aus der rechnerischen Partikelgrößenverteilung ermittelt, siehe Tabelle 7.



*PGV der Mischungen aus PGV der Einzelfractionen errechnet

Abbildung 26: Partikelgrößenverteilung für Kalkstein verschiedener Mischungen; Einzelfractionen zum Vergleich

3.3.3 Rohdichte und Schüttdichte

Eine wichtige Größe zur Prognose des Massedurchsatzes ist die Roh- und Schüttdichte. Die Ermittlung der Rohdichte ρ_{roh} erfolgt unter Nutzung des archimedischen Prinzips. Dieses besagt, dass in einem Medium die Auftriebskraft eines Körpers so groß ist, wie die Gewichtskraft des von ihm verdrängten Volumens des Mediums. Für die Dichtebestimmung wird die Masse einer Gesteinsprobe an Luft gemessen. Anschließend wird die Probe komplett in einen

auf einer Waage stehenden, vollständig mit Wasser gefüllten Behälter getaucht. Der angezeigte Messwert entspricht der Masse an verdrängtem Wasser. Mit der Dichte des Wassers lässt sich das Volumen des verdrängten Wassers und abschließend die Rohdichte der Gesteinsprobe errechnen.

Die Schüttdichte ρ_{Sch} wird angelehnt an DIN EN 1097-3 [56] ermittelt. Für die Bestimmung der Schüttdichte der Fraktion 60/120 mm kann das Durchmesser/Höhe-Verhältnis des Messgefäßes nicht eingehalten werden. Durch fehlende, ausreichend stabile Alternativen wird bei dieser Fraktion eine rechteckige Mörtelwanne (200 l Nennvolumen) eingesetzt, siehe dazu Abbildung 27. Die Wanne behält auch unter hoher Belastung ihre Form und damit auch ihr Volumen. Die genauen Volumina der Behältnisse werden durch jeweils drei unabhängig voneinander wiederholte Messungen mit Wasser bestimmt.



Abbildung 27: Behältnis zur Bestimmung der Schüttdichte der Fraktion 60/120 mm

Die Tabelle 8 fasst die Ergebnisse der Dichtermittlung zusammen. Die Rohdichte liegt im Bereich von 2660 kg/m³ (Andesit) bis 2810 kg/m³ (Diabas) und die Schüttdichte, abhängig von Material und Fraktion, zwischen ca. 1390 kg/m³ und ca. 1510 kg/m³.

Tabelle 8: Rohdichte ρ_{Roh} und Schüttdichte ρ_{Sch} der Versuchsmaterialien und ihren Fraktionen

Material	Fraktion [mm]	Rohdichte $\rho_{\text{Roh}} \pm \sigma$ [kg/m ³]	Schüttdichte $\rho_{\text{Sch}} \pm \sigma$ [kg/m ³]
Kalkstein	3/32	2700 ± 2	1508 ± 1
	32/63		1448 ± 18
	60/120		1446 ± 30
Andesit	32/63	2660 ¹⁾	1387 ± 8
Diabas	32/63	2810 ²⁾	1469 ± 2

¹⁾ aus Prüfzeugnis [57] nach DIN EN 1097-6 Anhang B [58]

²⁾ aus Prüfzeugnis [59] nach DIN EN 1097-6 [58]

3.3.4 Quantitative Gefügeanalyse

Da bestimmte Produkteigenschaften, von z. B. Edelsplitten, neben dem Aufbereitungsprozess auch von den Gesteinseigenschaften selbst abhängen, kann durch geeignete Auswahl des Gesteins Einfluss auf die Produktqualität genommen werden. Mit Hilfe der mathematisch-

petrografischen Methode der quantitativen Gefügeanalyse (QMA) nach POPOV [50] können die Eigenschaften der Gesteine mit quantitativen Kennwerten charakterisiert werden. Dazu zählen neben dem Modus (Mineralbestand) auch das Gefüge mit Struktur (Korngröße, Kornform und Rauigkeit) sowie die Textur (Verteilung, Orientierung und Raumerfüllung). Zur Ermittlung der Parameter werden aus einem Gesteinshandstück drei orthogonal zueinander stehende Dünnschliffe angefertigt. Anhand dieser Dünnschliffe können die Gesteinsparameter unter Zuhilfenahme von stereologischen Methoden bestimmt werden.

Der für die Untersuchungen eingesetzte Kalkstein liegt in zwei Varietäten vor (siehe dazu Abbildung 28). Die Varietät 1 besteht aus einem feinkörnigen Kalkstein, der vollständig aus Sparit (Kristallindividuen mit einer Größe von mehr als 5 μm) gebildet wird.

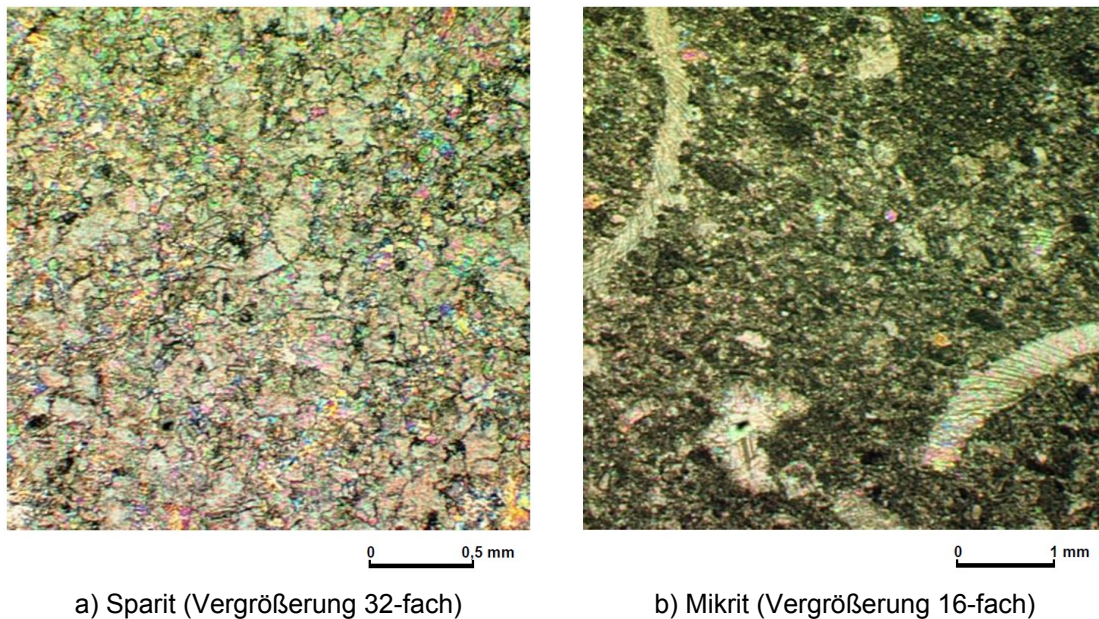


Abbildung 28: Dünnschliffe der untersuchten Kalksteinvarietäten (Lagerstätte Brilon)

Die Varietät 2 besteht hauptsächlich aus einer Matrix (Mikrit, bestehend aus karbonatischen Partikeln mit einer Korngröße kleiner als 5 μm) und Bioklasten, die vollständig mit Calcit ausgefüllt sind. Das Material ist so feinkörnig, dass es mittels optischer Mikroskopie für eine QMA nicht zu erfassen ist. Aufgrund der erkennbaren Isotropie des Gefüges und des weitgehend einheitlichen Mineralbestandes ist eine solche jedoch für dieses Material auch nicht notwendig.

Die Abbildung 29 zeigt die Dünnschliffe des untersuchten Andesits. Dieser weist ebenfalls mit 91 % einen großen Anteil an nicht differenzierbarer Phase (NDP) auf, die mittels Mikroskop nicht untersucht werden kann. In der NDP befinden sich jedoch große Pyroxeneinlagerungen. Der Diabas ist demgegenüber deutlich grobkörniger strukturiert (siehe Abbildung 30) und weist ebenso wie der Andesit einen Bestand an Erzmineralen auf.

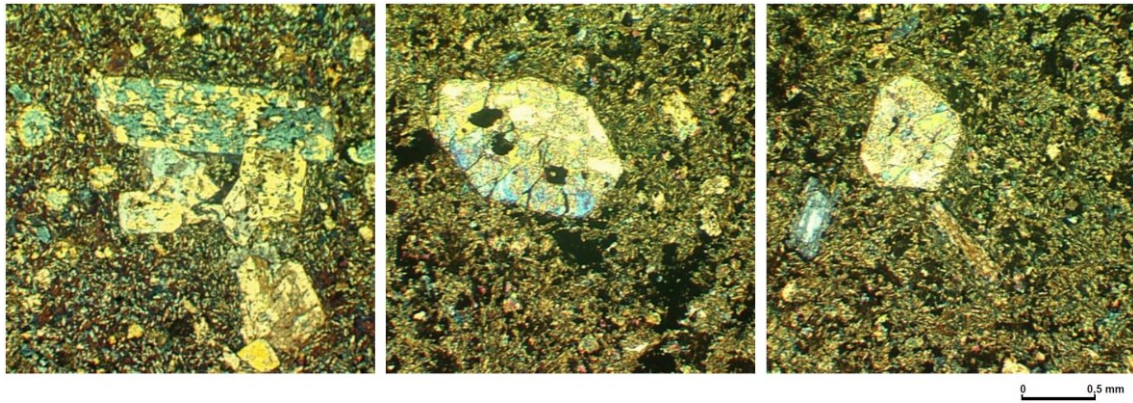


Abbildung 29: Dünnschliffe des Andesits (Lagerstätte Mammendorf), Vergrößerung 32-fach

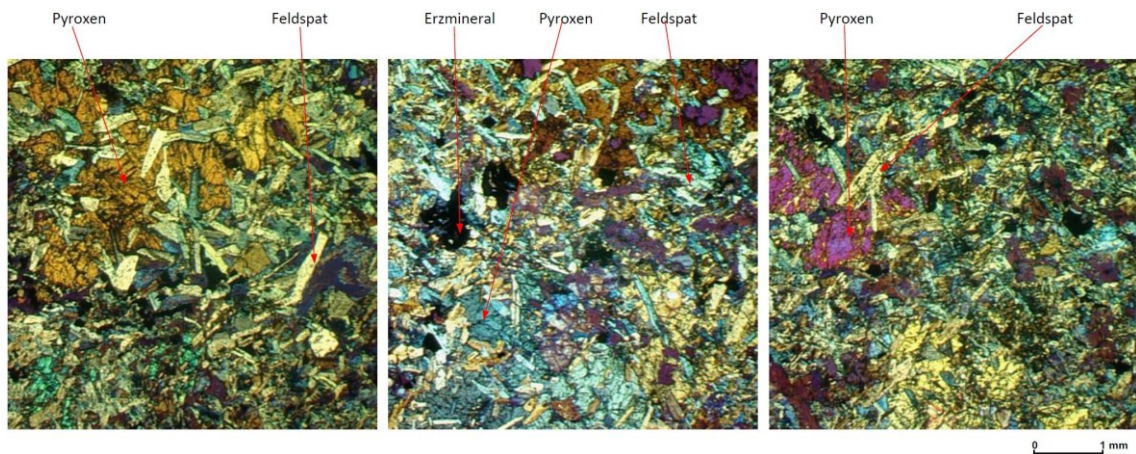


Abbildung 30: Dünnschliffe des Diabas (Lagerstätte Hildfeld (Winterberg)), Vergrößerung 16-fach

Die mit der QMA ermittelten Messwerte für Andesit und Diabas sind nachfolgend in Tabelle 9 und 10 dargestellt.

Tabelle 9: Quantitative Gefügedaten Andesit (Mammendorf)

Gestein		Typ: Andesit				Phasenbezogene Merkmale			Gesteinsmerkmale
		Lagerstätte: Mammendorf		Land: Sachsen-Anhalt					
Modus		Phasen		Art	Einheit	Pyroxen	Erzmineral	NDP	Σ Mikrokörper
		Phasenanteil	Volumenanteil	ε _V	%	8	1	91	9
Gefüge	Struktur	Korngröße	Medianwert	d _{50,3}	mm	0,506	0,288	-	0,490
			Standardabweichung	σ _{In}	-	0,360	0,104	-	0,358
		Kornoberfläche	Spezifische Oberfläche	S _V	mm ² /mm ³	15,290	35,530	-	16,770
		Kornform	Elongation	E	-	1,453	3,096	-	1,516
			Flachheit	F	-	1,119	1,129	-	1,143
		Rauigkeit	Rauigkeitsgrad	K _R	%	36	65	-	42
	Textur	Richtung	Linearer Orientierungsgrad	K _{lin}	%	25	58	-	27
			Flächiger Orientierungsgrad	K _{fl}	%	6	7	-	7
			Isotroper Orientierungsgrad	K _{is}	%	69	35	-	66
		Verteilung	Clusterbildungsgrad	C	%	0	0	-	0
		Raumerfüllung	Raumerfüllungsgrad	ε _{VF}	%	-	-	-	100

NDP - Nicht Differenzierbare Phase (Feldspat, Pyroxen, Erzmineral)

Tabelle 10: Quantitative Gefügedaten Diabas (Hildfeld)

Gestein		Typ: Diabas			Phasenbezogene Merkmale				Gesteinsmerkmale	
		Lagerstätte: Hildfeld(Winterberg)		Land: Nordrhein-Westfalen						
Modus		Phasen		Art	Einheit	Erzmineral	Feldspat	Pyroxen	NDP	Σ Mikrokörper
		Phasenanteil	Volumenanteil	ε _v	%	4	65	21	10	90
Gefüge	Struktur	Korngröße	Medianwert	d _{50,3}	mm	0,399	0,463	0,987	-	0,472
			Standardabweichung	σ _{in}	-	0,372	0,280	0,426	-	0,292
		Kornoberfläche	Spezifische Oberfläche	S _v	mm ² /mm ³	23,100	11,090	11,700	-	9,730
		Kornform	Elongation	E	-	1,000	1,547	1,542	-	1,592
			Flachheit	F	-	1,939	1,130	1,147	-	1,119
		Rauigkeit	Rauigkeitsgrad	K _R	%	46	23	65	-	34
	Textur	Richtung	Linearer Orientierungsgrad	K _{lin}	%	0	28	28	-	30
			Flächiger Orientierungsgrad	K _{fl}	%	32	7	7	-	6
			Isotroper Orientierungsgrad	K _{is}	%	68	65	65	-	64
		Verteilung	Clusterbildungsgrad	C	%	0	39	0	-	24
		Raumerfüllung	Raumerfüllungsgrad	ε _{vf}	%	-	-	-	-	100

NDP - Nicht Differenzierbare Phase (Chlorit)

Es ist erkennbar, dass der Diabas eine deutlich grobkörnigere Struktur aufgrund der größeren Korngrößen der Phasen und ebenso wie der Andesit einen niedrigen isotropen Orientierungsgrad aufweist. Beide Gesteine sind damit z. B. aufgrund des Bruchverhaltens für die Produktion von Edelsplitten eher weniger geeignet, da mit sinkendem Wert des isotropen Orientierungsgrades der Fehlkornanteil zunimmt [50, S. 92].

3.4 Versuchsdurchführung

Im folgenden Kapitel wird die Durchführung der Versuche beschrieben. Sie gliedert sich grundsätzlich in den Versuchsteil ohne Überpartikel, welcher die Versuche mit den Einzelfraktionen bis 120 mm und die Versuche mit Mischungen einschließt. Der andere Teil beinhaltet die Durchführung der Versuche mit Überpartikeln der Fraktionen 120 bis 250 mm.

Allen Versuchen gemein sind folgende Punkte:

- „Warmfahren“ der Anlage vor dem ersten Versuch
- Tarieren der Bandwaage ohne Material für zwei Umläufe des Fördergurtes
- Einstellung der Betriebsparameter des Brechers (Spaltweite, Walzendrehzahl, Walzenvorspanndruck)
- Starten der Datenerfassung und Kameraaufzeichnung
- Starten des Brechers

3.4.1 Versuche ohne Überpartikel

Die Einzelfraktionen bis 120 mm werden ohne Vorbereitung im Anlieferungszustand in den Bunker gefüllt. Das Material der Mischungsversuche muss jedoch zunächst hergestellt werden.

Dazu wird je nach Mischungsverhältnis jeweils eine dünne Schicht sich abwechselnder Fraktionen übereinander geschüttet. Die einzelnen Schichten werden dabei flach auf dem Boden ausgebreitet und nicht auf einen Haufen aufgeschüttet. Ein Anteil der Mischung entspricht einer vollen Schaufelfüllung eines Radladers mit $2,6 \text{ m}^3$ Schaufelvolumen. Nachdem alle Schichten übereinander gelegt sind, erfolgt nochmals eine intensive Durchmischung mittels Tieflöffelbagger, welcher das Material schließlich in den Bunker füllt. Das Material wird möglichst weit entfernt von der Austragsseite in den Bunker eingeschüttet, um einen gleichmäßigeren Ausfluss zu gewährleisten. Anschließend wird das Material bis an die Abwurfkante des Beschickungsförderers gefahren.

Nach Trieren der Messeinrichtungen, Starten der Datenaufzeichnung und des Brechers beginnt der Versuch. Zwischen Starten der Maschine und anschließender Materialzufuhr liegen mindestens 30 s, um die Messgrößen im Leerlauf aufzuzeichnen.

Ziel eines Versuchs ist es, den Brecher stets am Durchsatzmaximum zu betreiben, da der Grenzdurchsatz eine der wichtigsten Zielgrößen darstellt. Dazu erfolgt, wenn nötig, eine ständige Anpassung der dem Brecher zugeführten Materialmenge. Dies geschieht manuell über das Variieren der Bandgeschwindigkeit des Beschickungsförderers. Um von Versuchsbeginn an mit der maximal zuführbaren Materialmenge zu starten und somit die Zeit der Anfahrphase zu minimieren, werden für jede Versuchseinstellung vorher kurze Tastversuche gefahren. In diesen wird die maximal mögliche Geschwindigkeit des Beschickungsförderers bereits grob ermittelt.

Während eines Versuchs wird fortlaufend der Bunker gefüllt, um genug Material bereitzustellen. Dies ist vor allem für Versuchspunkte mit hohem Durchsatz notwendig, da hier das nutzbare Bunkervolumen nicht ausreicht. Die Dauer der stationären Phase beträgt mindestens 1:30 min und die durchgesetzte Masse durchschnittlich ca. 10 t. Zum Abschluss eines Versuchs wird durch Drücken der Not-Aus-Taste ein Notstop der Maschine erzwungen. Infolgedessen stoppen sofort die Materialzufuhr, der Brecher und auch der Abzugsförderer.

Vom Abzugsförderer wird nun eine Probe zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung genommen. Um den Förderer in ca. 3 m Höhe erreichen zu können, ist ein Gerüst aufgebaut. Die Probe selbst wird mit einer Probenahmeeinrichtung nach DIN EN 932-1 [60] auf dem Förderer begrenzt, anschließend abgeschaufelt und über einen Schlauch nach unten in das Probengefäß befördert, siehe Abbildung 31 und Abbildung 32. Die beiden Bleche der Probenahmeeinrichtung weisen eine gekrümmte Kontur entsprechend der Muldung des Bandes auf. Die Probenmasse entspricht der Mindestgröße für Messproben nach DIN EN 933-1 [53].



Abbildung 31: Probenahmeeinrichtung am Abzugsförderer



Abbildung 32: Probenahmerahmen nach [60] zum Entnehmen einer Probe vom Förderer

3.4.2 Versuche mit Überpartikeln

Um das Einzugsverhalten übergroßer, nicht sofort einziehbarer Partikel zu untersuchen sind zwei Vorgehensweisen denkbar. Die Schwierigkeit besteht darin, einen Versuchsablauf zu finden, welcher reproduzierbare Ergebnisse liefert und die Bedingungen der Praxis berücksichtigt. Zum einen kann diese Untersuchung im Rahmen von Einzelpartikelversuchen erfolgen, bei denen ein neues Partikel den Walzen erst nach der Zerkleinerung des vorherigen zugeführt wird. Diese Art von Versuchen entspricht jedoch nicht der Betriebsweise und den Aufgabebedingungen von Walzenbrechern in der Praxis, bei denen die Partikel im Massestrom und nicht einzeln aufgegeben werden. Gerade für große Überpartikel mit hoher Verweilzeit im Brechraum dürfte der Materialdruck und somit die Einschränkung der Bewegungsfreiheit eine große Rolle spielen. Daher wird die nachfolgend beschriebene Methode gewählt, welche das eingangs erwähnte Ziel erfüllt.

Bei den Versuchen mit Überpartikeln wird gleichzeitig die Fraktion 32/63 mm und die jeweilige Überpartikelfraktion zugeführt. Ziel der Versuche ist es, den maximalen Durchsatz der Fraktion 32/63 mm zu ermitteln, wenn sich stets ein Partikel der jeweiligen Überpartikelfraktion im Brechraum befindet. Die Überpartikel werden dem Brechraum dabei von Hand zugeführt. Die Anzahl der Überpartikel ist durch den zur Verfügung stehenden Platz an der Bühne des Brechereinlaufs beschränkt und kann der Tabelle 11 entnommen werden. Wenn das letzte Überpartikel den Brechraum passiert hat, wird die Materialzufuhr der Fraktion 32/63 mm gestoppt und der Versuch beendet. Pro Versuchspunkt werden insgesamt fünf Versuche durchgeführt.

Tabelle 11: Anzahl an zugeführten Überpartikeln in Abhängigkeit der Fraktion

Fraktion [mm]	Anzahl [-]
120/160	30
160/200	15
200/250	8

Eine Probenahme zur Aufnahme der Partikelgrößenverteilung erfolgt nicht, da der Prozentsatz an Überpartikeln gegenüber der Fraktion 32/63 mm gering ist und sich die Partikelgrößenverteilung des Brechproduktes damit nicht maßgeblich von der der Einzelfraktion unterscheidet.

4 Ergebnisse und Auswertung

In diesem Kapitel werden zunächst die Analyse- bzw. Auswertemethoden der Messdaten und Zerkleinerungsprodukte beschrieben. Anschließend werden die daraus gewonnenen Ergebnisse hinsichtlich der Zielgrößen dargestellt und interpretiert. Zur Auswertung der elektronisch aufgenommenen Messdaten wird die Auswertesoftware FLEXPRO 2017 (Version 11.0.10) der Firma WEISANG verwendet.

Wenn in der Auswertung von Spalt bzw. Spaltweite gesprochen wird, bezieht sich diese im Hinblick auf den Versuchsbrecher auf die Spaltweite zwischen den Grundkreisradien der beiden Walzen, demnach die Spaltweite s_{r5} . Die Walzenumfangsgeschwindigkeit bezieht sich auf den Spitzenkreisdurchmesser der Walzen am Radius R_S . In den Diagrammen selbst wird die Walzenumfangsgeschwindigkeit mit „roll speed“ bezeichnet, um somit die Übersichtlichkeit zu wahren. Weiterhin entsprechen in den Diagrammen die Fehlerbalken in positiver und negativer Richtung jeweils der einfachen Standardabweichung σ .

4.1 Einzugsverhalten übergroßer Partikel

Wie im Abschnitt 3.4.2 dargestellt, werden zur Untersuchung des Einzugsverhaltens von Überpartikeln einzelne Überpartikel zusammen mit der Fraktion 32/63 mm aufgegeben, um den Materialdruck zu berücksichtigen bzw. die Partikelbewegung der Überpartikel einzuschränken. Zur Auswertung wird aus der Versuchsdauer und der Anzahl an aufgegebenen Steinen durch Mittelwertbildung mehrerer Versuche die Verweilzeit t_V pro Stein berechnet.

In der Abbildung 33 ist die Verweilzeit für verschiedene Überpartikelfractionen und Spaltweiten dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit steigender Partikelgröße und kleinerer Spaltweite die Verweilzeit der Steine im Brechraum überproportional zunimmt. Während sie für die Fraktion 200/250 mm und 90 mm Spaltweite bei ca. 12 s liegt, erhöht sie sich bei 50 mm Spaltweite auf fast das 4-fache, d. h. ca. 46 s. Erwartungsgemäß liegen die Verweilzeiten bei 90 mm Spaltweite am niedrigsten. Je größer die Partikelgröße, desto größer sind auch die Unterschiede der Verweilzeiten hinsichtlich der verschiedenen Spaltweiten. Die Standardabweichung nimmt bei größeren Partikelgrößen und kleinerer Spaltweite zu.

Durch eine Regression der Datenpunkte kann auf Einzugszeiten für kleinere Partikelgrößen geschlossen werden. In diesem Fall liefert eine Potenzfunktion das höchste Bestimmtheitsmaß. Die Bestimmtheitsmaße liegen zwischen $R^2 = 0,98 \dots 1$. Trotzdem muss bei dieser Vorgehensweise beachtet werden, dass zur Abschätzung für kleinere Partikel die Funktion über den eigentlichen Untersuchungsbereich hinaus extrapoliert wird und dieses Vorgehen eine Unsicherheit darstellt.

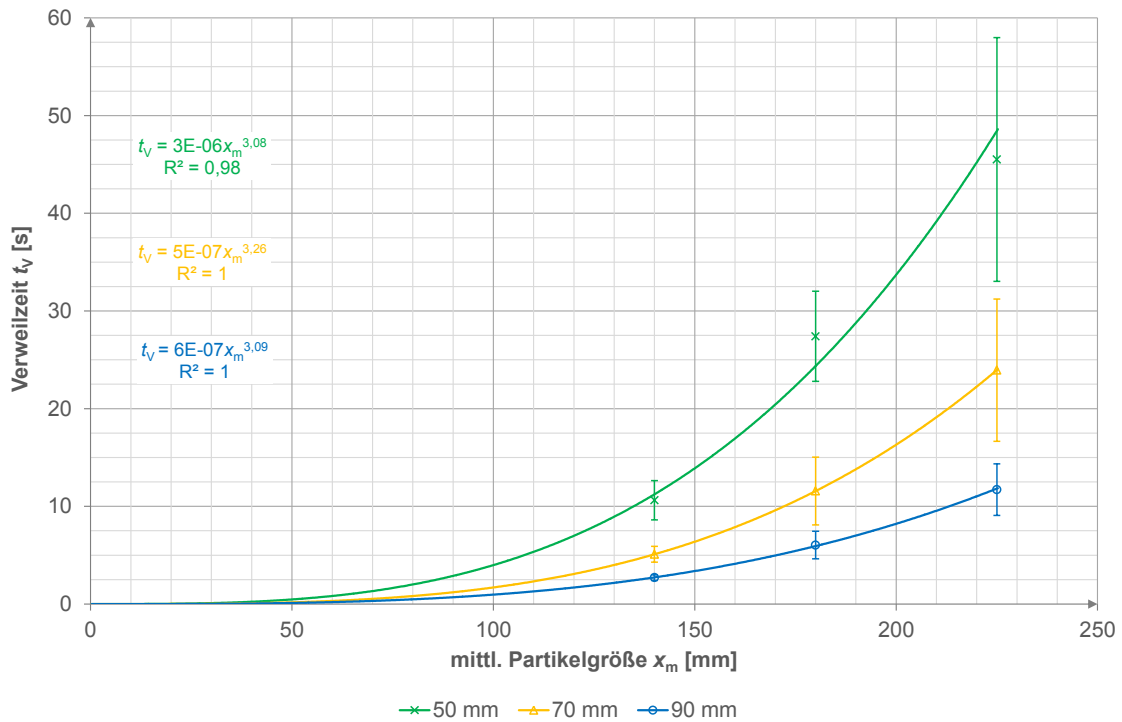


Abbildung 33: Verweilzeit in Abhängigkeit der mittleren Fraktionsgröße und Spaltweite für Einzelpartikel mit Materialdruck (Kalkstein), Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s

Im Vergleich zu durchgeführten Versuchen ohne Materialdruck bei 70 mm Spaltweite ist bei den Versuchen mit Materialdruck die Verweilzeit bei größter Partikelgröße im untersuchten Bereich ca. 50 % niedriger. Dies zeigt, dass sich die Einzugszeit von übergroßen Partikeln durch nachströmendes Material signifikant verkürzt.

Wird nun die Verweilzeit t_v über dem Verhältnis s_{r5}/x_m von Spaltweite zu mittlerer Fraktionsgröße aufgetragen, ergibt sich das Diagramm in Abbildung 34. Zunächst bedeutet ein s_{r5}/x_m -Verhältnis von 1, dass die Größe des Spalts gleich der Partikelgröße ist. Bei Verhältnissen kleiner 1 sind die Partikel größer als die Spaltweite. Für Verhältnisse größer 1 gilt Umgekehrtes. Die Datenpunkte zeigen eine stetig fallende Verweilzeit mit steigendem s_{r5}/x_m -Verhältnis. Der dargestellte Zusammenhang lässt sich mittels einer Potenzfunktion nach Gleichung (4.1) mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,98$ approximieren.

$$t_v = 0,86 \cdot \left(\frac{s_{r5}}{x_m} \right)^{-2,69} \quad (4.1)$$

Mit Hilfe der Regressionsgleichung nach Gleichung (4.1) wird der Zusammenhang von Verweilzeit und Partikelgröße für verschiedene Spaltweiten weiter verallgemeinert. Somit kann nun für beliebige Werte von Partikelgröße und Spaltweite für den Versuchsbrecher im untersuchten Bereich die Verweilzeit von übergroßen Einzelpartikeln mit Materialdruck errechnet werden.

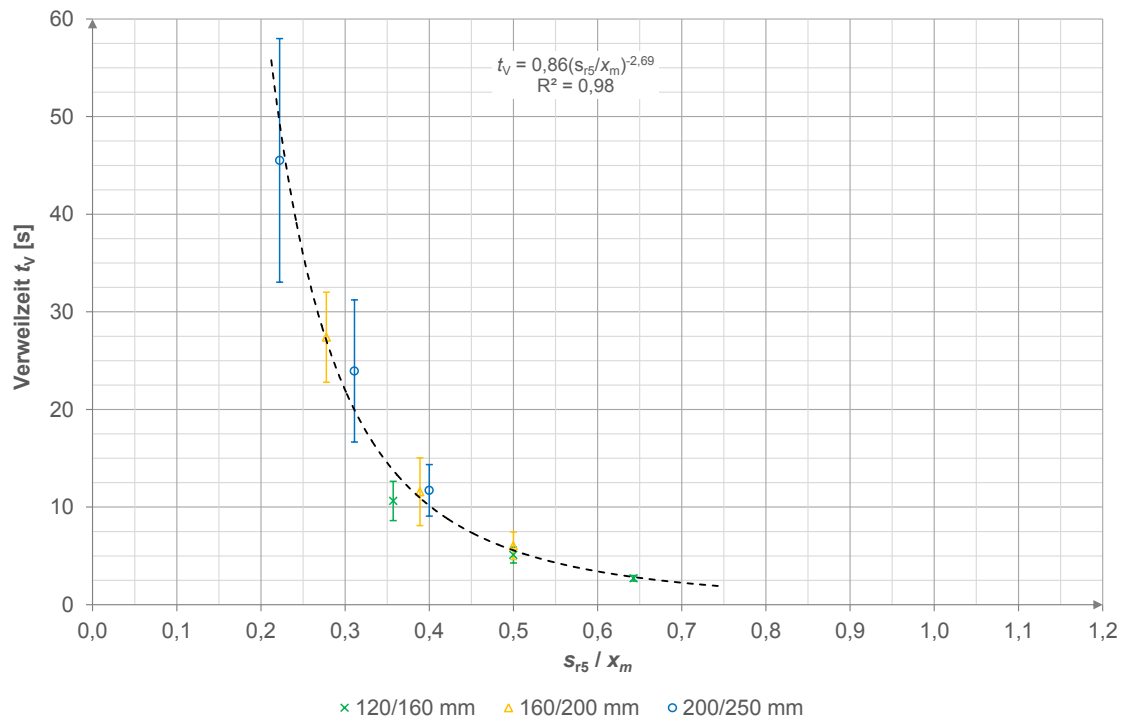


Abbildung 34: Verweilzeit in Abhängigkeit des Verhältnisses von Spaltweite zu mittlerer Fraktionsgröße für unterschiedliche Fraktionen von Einzelpartikeln mit Materialdruck (Kalkstein), Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s

4.2 Partikelgrößenverteilung der Zerkleinerungsprodukte

Zur Beurteilung bzw. Bewertung des Zerkleinerungserfolgs wird die Partikelgrößenverteilung des Zerkleinerungsproduktes aufgenommen. Im Kapitel 3.4.1 wurde bereits beschrieben, wie die Probenahme des Zerkleinerungsproduktes eines Versuchs erfolgt. Die anschließende Prüfsiebung ist an DIN EN 933-1 [53] angelehnt. Dazu wird die Probe zunächst bei 105 °C bis zur Massekonstanz getrocknet. Das vorherige Waschen der Probe wurde nicht durchgeführt, da durch das Materialhandling nach dem Trockenprozess anhaftendes Material und Verklumpungen hinreichend gut gelöst werden. Für die Analysensiebung werden die Maschenweiten nach Tabelle 12 verwendet. Die gewählten Maschenweiten w entsprechen weitestgehend der Siebreihe R 20/3. Die Partikelklassen größer als 22,4 mm weisen im Allgemeinen den größten Masseanteil im Zerkleinerungsprodukt auf. Daher wird aus Gründen der Umsetzbarkeit für Maschenweiten $w \geq 31,5$ mm keine Maschinensiebung, sondern eine Handsiebung bis zur Massekonstanz durchgeführt. Hier wird nach kurzem händischen Schütteln des Siebes jedes Partikel von Hand durch mehrfaches Drehen und Wenden mit einer Siebmasche abgeglichen. Ist die Maschenweite $w < 31,5$ mm, erfolgt eine Maschinensiebung mit einer Analysensiebmaschine (Typ: HAVER EML 450 digital plus). Für Kalkstein wurde eine Siebzeitanalyse durchgeführt, bei welcher der Siebprozess als beendet gilt, wenn sich die Masse des Rückstandes auf jedem Sieb bei einer zusätzlichen Siebung von einer Minute um nicht mehr als 1,0 % ändert [53]. Die damit ermittelte Siebzeit beträgt 10 min. Sie wird auch für die anderen beiden in dieser Arbeit verwendeten Gesteine (Andesit und Diabas) angewendet.

Tabelle 12: Verwendete Maschenweiten der Analysensiebung

Maschenweite w [mm]	Siebungstyp	Maschenweite w [mm]	Siebungstyp
180	manuell (Durchsteck- siebung)	22,4	Analysesieb- maschine
125		16	
90		11,2	
63		8	
45		6,3	
31,5		4	
		2	
		1	

Zur Charakterisierung der Zerkleinerungswirkung werden neben der Partikelgrößenverteilung als Ganzes und den Kennwerten wie x_{50} und x_{95} auch das Zerkleinerungsverhältnis ε verwendet. In dieser Arbeit werden zwei Kennwerte ε_{50} und ε_{95} zur Beurteilung herangezogen. Diese berechnen sich wie folgt:

$$\varepsilon_{50} = \frac{x_{A,50}}{x_{P,50}} \quad (4.2)$$

Zerkleinerungsverhältnis

$$\varepsilon_{95} = \frac{x_{A,95}}{x_{P,95}} \quad (4.3)$$

Nachfolgend werden die Partikelgrößenverteilungen hinsichtlich des Einflusses von Spaltweite, Partikelgrößenverteilung der Aufgabe, Gesteinsart der Aufgabe und der Walzenumfangsgeschwindigkeit ausgewertet.

4.2.1 Einfluss der Walzenumfangsgeschwindigkeit

In diesem Kapitel wird der Einfluss der Walzenumfangsgeschwindigkeit (bzgl. Radius R_S) auf die Partikelgrößenverteilung des Produktes für unterschiedliche Aufgabefractionen und Walzenspalte gezeigt. Dabei werden Walzenumfangsgeschwindigkeiten von 2 m/s, 4 m/s, 6 m/s und 8 m/s untersucht. Um die Zerkleinerungswirkung beurteilen zu können, werden in den Diagrammen auch die beiden Zerkleinerungsverhältnisse ε_{50} und ε_{95} angegeben.

Für die Aufgabefraktion 3/32 mm des Kalksteins kann eine Auswertung hinsichtlich der Walzenumfangsgeschwindigkeit nicht vorgenommen werden, da hier durchsatzbedingt nicht für jede Umfangsgeschwindigkeit Proben genommen werden konnten.

Aufgabefraktion 32/63 mm

Die Abbildung 35 zeigt die Partikelgrößenverteilungen für Kalkstein der Aufgabefraktion 32/63 mm bei 50 mm Walzenspalt.

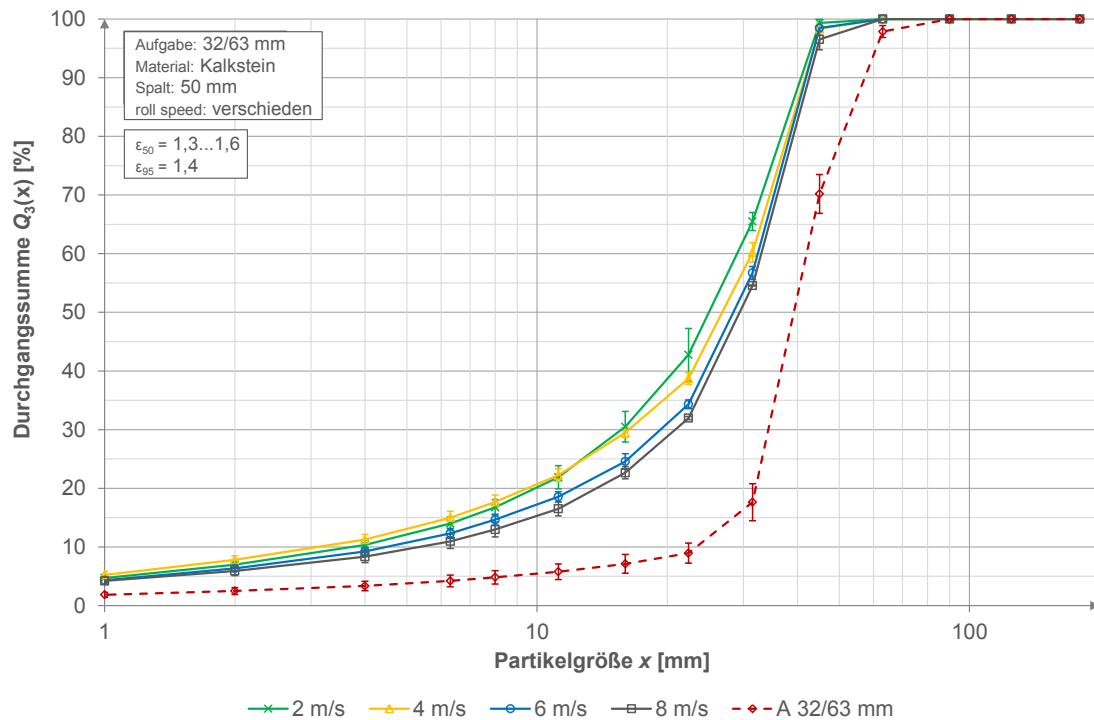


Abbildung 35: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Walzenumfangsgeschwindigkeit für Kalkstein, Aufgabefraktion 32/63 mm, Spaltweite 50 mm

Es ist zu erkennen, dass sich die Produktkurven mit zunehmender Umfangsgeschwindigkeit in Richtung größerer Partikelgrößen verschieben. Entgegen der Darstellung in der Literatur (siehe [33] im Kapitel 2.3.3) wird mit höherer Umfangsgeschwindigkeit das Produkt gröber. Dies liegt vermutlich darin begründet, dass die Versuche im Gegensatz zur üblichen Betriebsweise von Doppelwalzenbrechern möglichst nahe am Überschüttungszustand durchgeführt wurden. Folglich wird ein Teil des Materials beim Auftreffen auf die Walzen vollständig abgebremst und anschließend beim Einzug wieder beschleunigt. Dabei können langsame Umfangsgeschwindigkeiten eine partielle Gutbettbildung im Walzenspalt begünstigen. Bei dieser stützen sich die Partikel in bestimmten Bereichen des Walzenspalts gegenseitig und es werden auch Partikel zerkleinert, die ohne gegenseitige Abstützung unzerkleinert durch den Walzenspalt gelangen würden. Höhere Walzenumfangsgeschwindigkeiten verschlechtern die Bedingungen der Gutbettbildung, da der Füllungsgrad im Walzenspalt durch die höhere Beschleunigung der Partikel geringer wird, sodass gröbere Zerkleinerungsprodukte entstehen.

Die Unterschiede der Durchgangssummenverteilung sind jedoch gering und betragen maximal ca. 11 %. Im Bereich $x < 16$ mm gibt es minimale Überschneidungen der Kurven von 2 m/s und 4 m/s. Die $x_{P,50}$ -Werte liegen in einem engen Bereich zwischen 25 mm und 30 mm, siehe dazu Tabelle 13.

Tabelle 13: Kennwerte der Produktpartikelgrößenverteilung zu Abbildung 35, Aufgabefraktion Kalkstein 32/63 mm bei verschiedenen Umfangsgeschwindigkeiten, Spaltweite 50 mm

v_U [m/s]	$x_{P,5}$ [mm]	$x_{P,50}$ [mm]	$x_{P,95}$ [mm]	$x_{P,max}$ [mm]
2	1,1	25,3	43,3	63
4	1,0	27,2	43,8	63
6	1,3	28,8	43,9	63
8	1,5	29,7	44,5	63
Aufgabe	8,6	39,8	61,1	90

Das Zerkleinerungsverhältnis nimmt mit größer werdender Umfangsgeschwindigkeit entsprechend ab und liegt zwischen $\varepsilon_{50} = 1,6$ (bei 2 m/s) und $\varepsilon_{50} = 1,3$ (bei 8 m/s). Die obere Partikelgröße des Produktes liegt bei $x_{P,max} = 63$ mm.

Für Andesit und Diabas (Aufgabefraktion 32/63 mm, 50 mm Spaltweite) sind die Abbildung 70 und Abbildung 71 im Anhang A.2 zu betrachten. Für diese beiden Gesteine stellt sich der gleiche Zusammenhang (siehe Abbildung 35) dar, wenngleich nicht so ausgeprägt, da beide Gesteine im Vergleich zu Kalkstein weniger zur Gutbettbildung neigen. Mit steigender Walzenumfangsgeschwindigkeit wird das Produkt gröber. Jedoch fallen bei beiden Gesteinen die Kurven von 4 m/s bis 8 m/s in einem engen Bereich zusammen, nur die Kurve von 2 m/s verschiebt sich deutlich in den feinen Bereich. Die Zerkleinerungsverhältnisse liegen ähnlich niedrig wie bei Kalkstein bei $\varepsilon_{50} = 1,2 \dots 1,4$ und nehmen auch mit zunehmender Walzenumfangsgeschwindigkeit ab. Die maximale Produktpartikelgröße liegt ebenfalls bei 63 mm.

Für Kalkstein bei einer Spaltweite von 70 mm ergibt sich kein klarer Zusammenhang hinsichtlich der Abhängigkeit von der Walzenumfangsgeschwindigkeit, siehe Abbildung 72 im Anhang A.2. Im Bereich $x < 35$ mm ergibt sich für 2 m/s das feinste Produkt, während bei $x > 35$ mm das feinste Produkt bei 4 m/s und 6 m/s entsteht. Die Zerkleinerungsverhältnisse liegen nur noch bei $\varepsilon_{50} = 1,0 \dots 1,1$, sodass kaum eine Zerkleinerung auftritt.

Bei einer Spaltweite von 90 mm wird der Kalkstein der Fraktion 32/63 mm nicht mehr zerkleinert. Dies ist an der Deckungsgleichheit der Kurven von Produkt- und Aufgabepartikelgrößenverteilung zu erkennen, siehe Abbildung 73 im Anhang A.2, sowie an den Zerkleinerungsverhältnissen von $\varepsilon_{50} = \varepsilon_{95} = 1,0$.

Aufgabefraktion 60/120 mm

Bei der Aufgabefraktion 60/120 mm wird nur Kalkstein ausgewertet, da für Andesit nur Proben bei 4 m/s genommen wurden und damit keine Abhängigkeit hinsichtlich der Umfangsgeschwindigkeit gezeigt werden kann. Die Zusammenhänge werden am Beispiel des Walzenspaltes 70 mm dargestellt, siehe Abbildung 36.

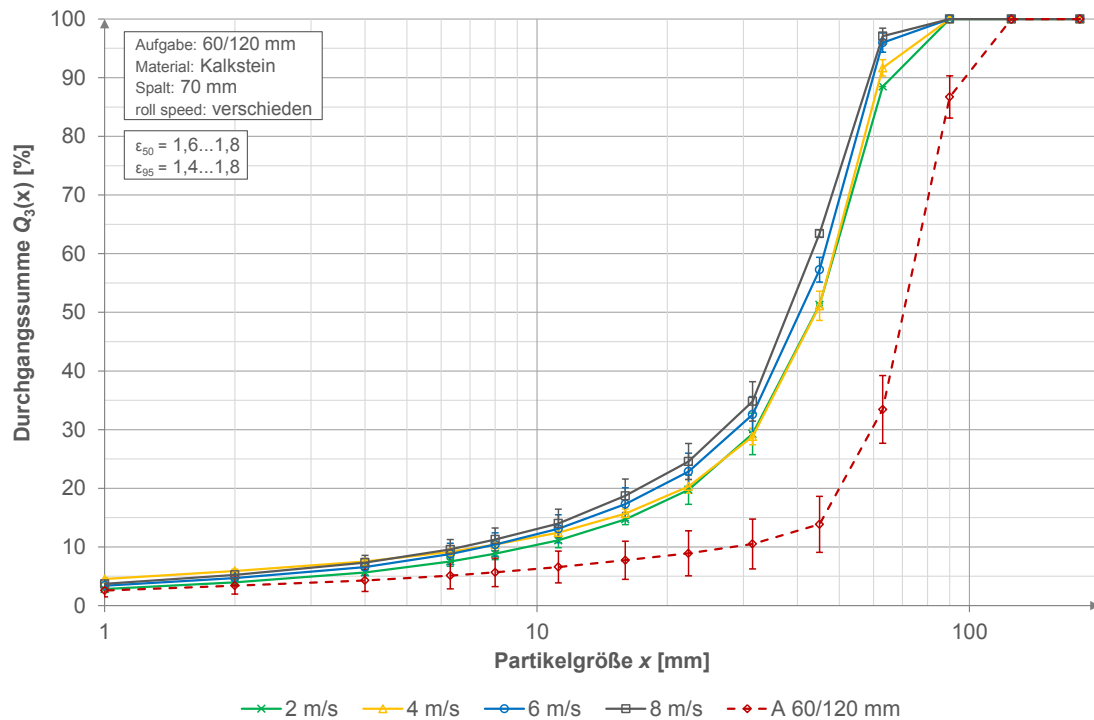


Abbildung 36: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Walzenumfangsgeschwindigkeit für Kalkstein, Aufgabefraktion 60/120 mm, Spaltweite 70 mm

Die Abbildung 36 zeigt tendenziell ein mit steigender Walzenumfangsgeschwindigkeit feineres Produkt, wobei die Kurven für 2 m/s und 4 m/s bzw. 6 m/s und 8 m/s unter Einbezug der Schwankungsbereiche in großen Teilen zusammen fallen. Auch die Zerkleinerungsverhältnisse nehmen geringfügig zu ($\varepsilon_{50} = 1,6 \dots 1,8$). Die Unterschiede der Durchgangssumme betragen maximal ca. 12 %. Für die beiden anderen Spaltweiten 50 mm und 70 mm, siehe Abbildung 74 und Abbildung 75 im Anhang A.2, ergibt sich weitestgehend der gleiche Zusammenhang, wenngleich nicht so deutlich. Diese Abhängigkeit ist gegensätzlich zu der von der Aufgabefraktion 32/63 mm im Abschnitt vorher und entspricht den Literaturangaben (siehe [33] im Kapitel 2.3.3).

Trotz der sich teilweise überlappenden Kurven soll ein Erklärungsansatz folgen. Durch den deutlich größeren Masseanteil von Partikeln in der Fraktion 60/120 mm, welche größer als die Spaltweite sind, und den damit verbundenen Einzugsbedingungen, verliert vermutlich der Mechanismus der Gutbettbildung aus mehreren, gleichzeitig eingezogenen kleineren Partikeln an Bedeutung. Es findet überwiegend Einzelpartikelzerkleinerung von Partikeln mit deutlich größerer Einzelmasse statt. Infolge der höheren Walzenumfangsgeschwindigkeit und der damit verbundenen größeren Beanspruchungsgeschwindigkeit haben die Bruchstücke immer weniger Zeit auszuweichen. Dadurch kommt es möglicherweise zur Gutbettbildung der aus großen Einzelpartikeln entstandenen Bruchstücke und infolgedessen zu einer höheren Zerkleinerungswirkung.

Mischungen

Weiterhin wurden für die Mischungen 1-2-1 und 1-1-4 nur bei einer Umfangsgeschwindigkeit (4 m/s) Versuche durchgeführt, sodass keine Auswertung hinsichtlich der Walzenumfangsgeschwindigkeit erfolgen kann.

Zusammenfassend ist der Einfluss der Walzenumfangsgeschwindigkeit auf die Partikelgrößenverteilung als gering einzuschätzen. Der größte Einfluss wurde bei einem Walzenspalt von 50 mm und der Fraktion 32/63 mm festgestellt. Hier betrug die Abweichung des $x_{P,50}$ -Wertes für die verschiedenen Umfangsgeschwindigkeiten 17 % ($x_{P,50}$ -Wert bei 2 m/s entspricht 100 %). Bei allen anderen Kombinationen von Aufgabepartikelgröße, Walzenspalt und Walzenumfangsgeschwindigkeit war der Einfluss z. T. deutlich geringer bzw. kaum nachweisbar.

Da sich durch Variation der Walzenumfangsgeschwindigkeit die Partikelgrößenverteilung des Zerkleinerungsproduktes nur geringfügig beeinflussen lässt, werden für die folgenden Auswertekapitel 4.2.2 bis 4.2.4 nur die Kurven für 4 m/s Umfangsgeschwindigkeit dargestellt.

4.2.2 Einfluss der Spaltweite

Der Einfluss des Walzenspaltes wird am Beispiel von Kalkstein der Fraktion 32/63 mm und 60/120 mm gezeigt. Die Diagramme für Kalkstein der Mischungen 1-2-1 und 1-1-4 sind der Abbildung 76 bis Abbildung 77 im Anhang A.2 zu entnehmen.

Aufgabefraktion 32/63 mm

In der Abbildung 37 sind die Partikelgrößenverteilungen der Zerkleinerungsprodukte der Aufgabefraktion 32/63 mm von Kalkstein in Abhängigkeit vom Walzenspalt dargestellt. Das Diagramm zeigt, dass nur bei 50 mm Spaltweite eine nennenswerte Zerkleinerungswirkung erzielt wird. Das Zerkleinerungsverhältnis ε_{50} liegt hier bei 1,5. Bereits ab 70 mm Spaltweite tritt nur noch eine geringe Zerkleinerung auf ($\varepsilon_{50} = 1,1$). Bei 90 mm Spaltweite liegt die Produktkurve erwartungsgemäß nahezu deckungsgleich zur Aufgabeverteilung, sodass keine Zerkleinerung sondern nur Materialtransport erfolgt. Bei allen drei Spaltweiten wird jedoch eine Verringerung der maximalen Partikelgröße auf 63 mm erzielt, auch wenn in der Aufgabe nur ein geringer Anteil von 2 % größer 63 mm vorhanden war. Daher lässt sich der Einfluss des Walzenspaltes bei dieser Fraktion nicht deutlich herausstellen.

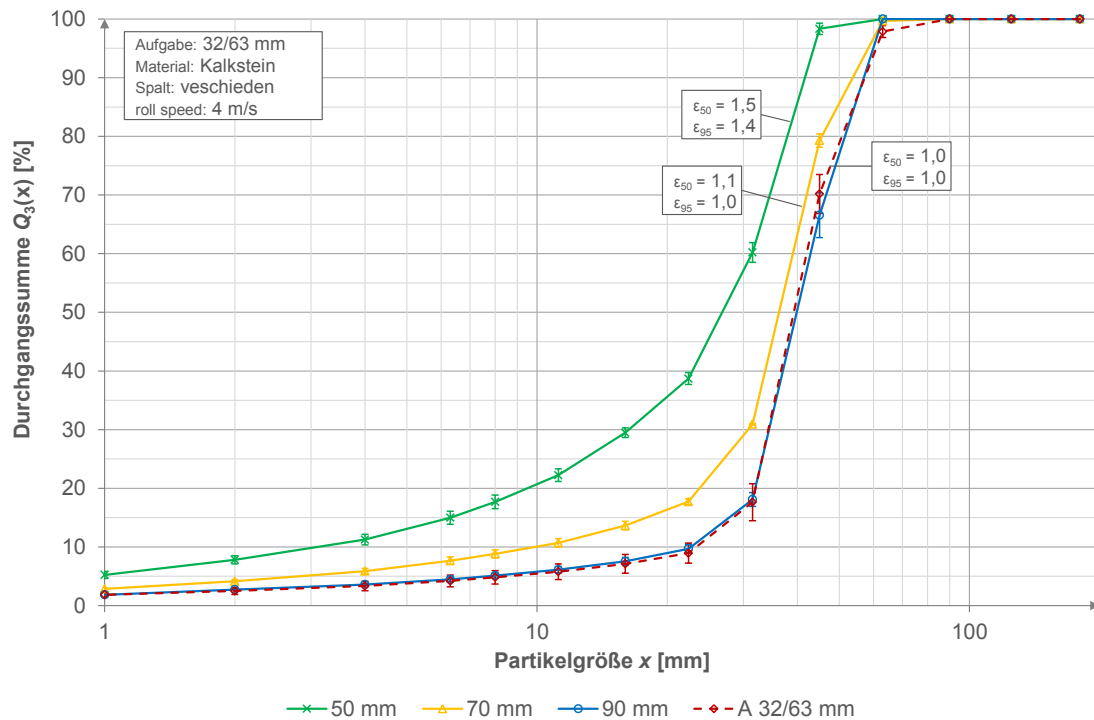


Abbildung 37: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Spaltweite für Kalkstein, Aufgabefraktion 32/63 mm, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s

Aufgabefraktion 60/120 mm

Anhand der Fraktion 60/120 mm lässt sich der Einfluss des Walzenspaltes besser zeigen, da hier der Großteil des Materials größer als die Spaltweite ist (gilt für 50 mm und 70 mm). Für Kalkstein ist die Abbildung 38 zu betrachten. Es ist zu erkennen, dass erwartungsgemäß die Partikelgrößenverteilung feiner wird, je kleiner die Spaltweite ist. Dies zeigt auch der $x_{P,50}$ -Wert, welcher sich von 57 mm (bei 90 mm Spaltweite) auf 25 mm (bei 50 mm Spaltweite) verringert (siehe dazu Tabelle 14). Dies entspricht einer Änderung um ca. 57 %. Demzufolge nehmen auch die Zerkleinerungsverhältnisse ε_{50} von 1,2 bis 2,9 zu. Mit zunehmendem Zerkleinerungsverhältnis nimmt die Steigung der Kurve der Partikelgrößenverteilung ab, d. h. es wird in zunehmendem Maß Feingut produziert, was bei Primärbrechern häufig unerwünscht ist.

Tabelle 14: Kennwerte der Produktpartikelgrößenverteilung zu Abbildung 38, Aufgabefraktion Kalkstein 60/120 mm bei verschiedenen Spaltweiten, Umfangsgeschwindigkeit 4 m/s

Spalt s_{r5} [mm]	$x_{P,5}$ [mm]	$x_{P,50}$ [mm]	$x_{P,95}$ [mm]	$x_{P,max}$ [mm]
50	0,8	24,8	45,2	63,0
70	1,3	44,3	73,8	90,0
90	7,2	57,2	86,7	90,0
Aufgabe	6,0	71,4	111,9	125,0

Der $x_{P,5}$ -Wert des Produkts bei 90 mm Spaltweite ist größer als in der Aufgabe (siehe dazu Tabelle 14). Dieser Unterschied ist mit der Schwankung in der Aufgabeverteilung zu begründen.

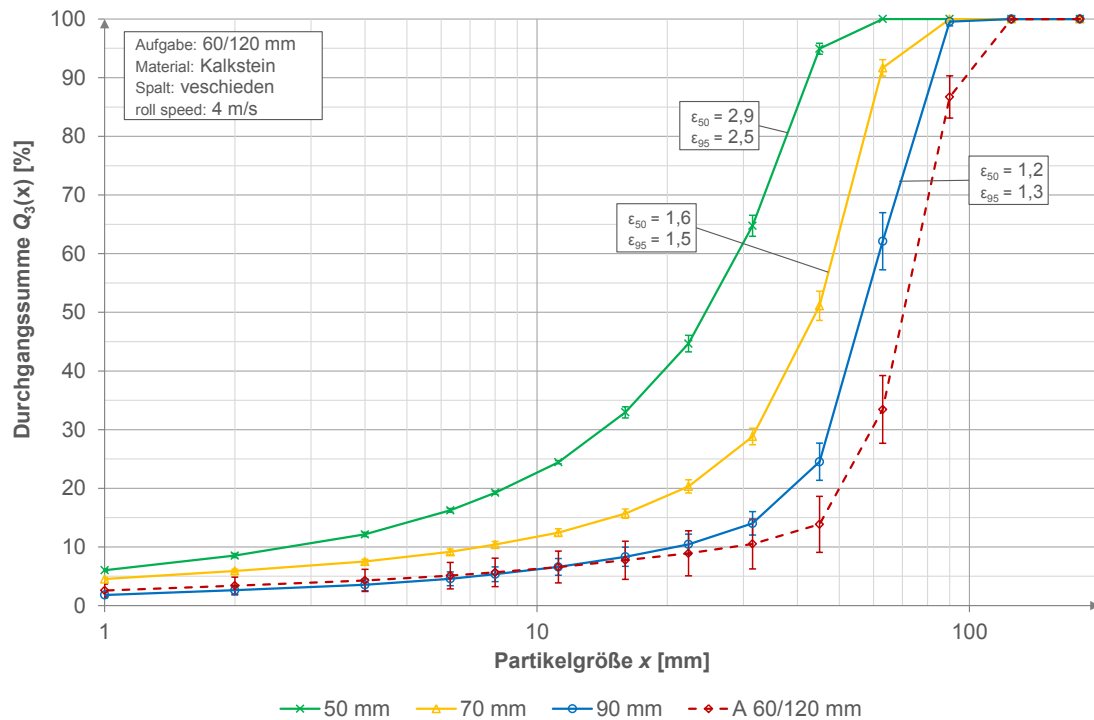


Abbildung 38: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Spaltweite für Kalkstein, Aufgabefraktion 60/120 mm, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s

Für Andesit der Fraktion 60/120 mm (siehe Abbildung 78 im Anhang A.2) ergeben sich im Allgemeinen die gleichen Zusammenhänge, wenn auch nicht so ausgeprägt. Die maximalen Produktpartikelgrößen sind verglichen mit Kalkstein gleich groß; außer für 90 mm Spaltweite, bei der $x_{P,max} = 125$ mm beträgt.

4.2.3 Einfluss der Aufgabeverteilung

Der Einfluss der Aufgabeverteilung auf die Partikelgrößenverteilung des Zerkleinerungsproduktes wird ebenfalls am Beispiel von Kalkstein gezeigt. Nur bei 50 mm Spaltweite wurden alle drei Fraktionen untersucht. Die Abbildung 41 zeigt eine Gegenüberstellung der Kurven der Partikelgrößenverteilung der Produkte der jeweiligen Fraktion (durchgezogene Linie) mit den Kurven der dazugehörigen Aufgabefractionen (gestrichelte Linie). Es ist zu erkennen, dass die Produkte der Fraktionen 32/63 mm und 60/120 mm nur geringe Unterschiede aufweisen, obwohl die Verteilung des Aufgabematerials signifikant unterschiedlich ist. Dies zeigen auch die $x_{P,5}$, $x_{P,50}$ und $x_{P,95}$ Werte, die sich jeweils in einem engen Bereich befinden, siehe dazu Tabelle 15. Demzufolge ist zu vermuten, dass die Partikelgrößenverteilung des Zerkleinerungsprodukts für Aufgabematerial mit einem $x_{A,50}$ im Bereich oder oberhalb der Spaltweite maßgeblich vom Walzenspalt und weniger stark von der Partikelgrößenverteilung des Aufgabematerials abhängt. Das Zerkleinerungsverhältnis ist dann offensichtlich von geringerer Bedeutung, da ϵ_{50} bei der Fraktion 32/63 mm mit 1,5 wesentlich niedriger als bei der Fraktion 60/120 mm mit 2,5 liegt.

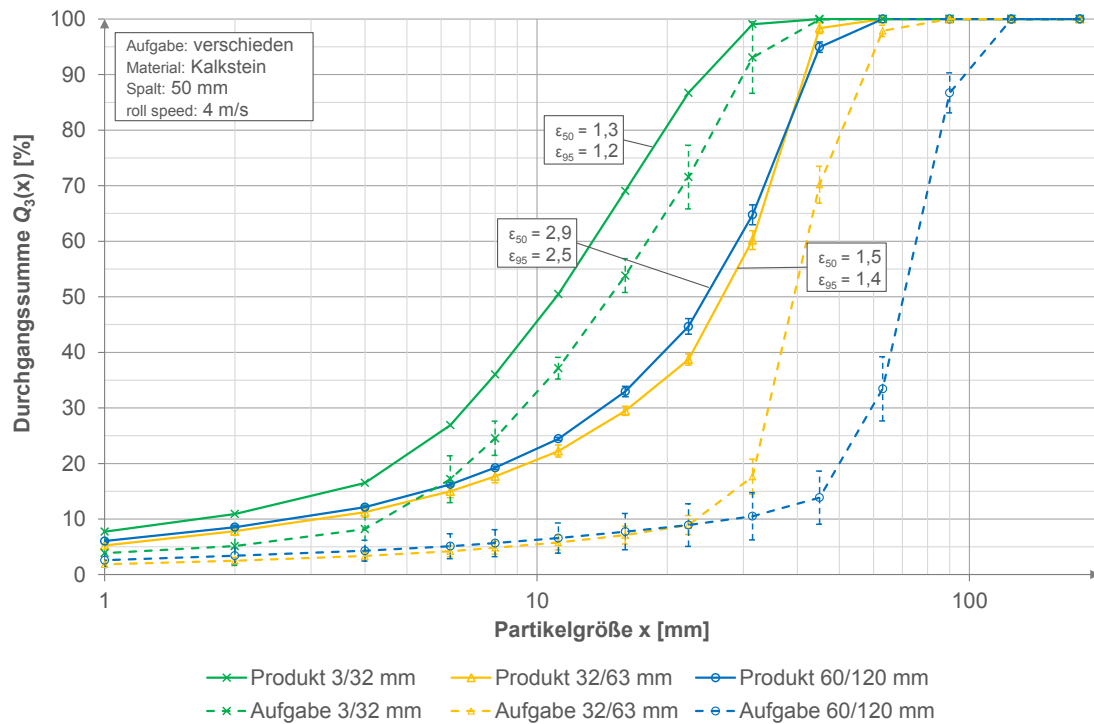


Abbildung 39: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit von der Aufgabeverteilung für Kalkstein, Spaltweite 50 mm, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s

Tabelle 15: Kennwerte der Produktpartikelgrößenverteilung zu Abbildung 39 für Kalkstein, Aufgabefractionen verschieden, Spaltweite 50 mm, Umfangsgeschwindigkeit 4 m/s

Aufgabefraktion [mm]	$x_{P,5}$ [mm]	$x_{P,50}$ [mm]	$x_{P,95}$ [mm]	$x_{P,max}$ [mm]
3/32	0,6	11,1	28,5	31,5
32/63	1,0	27,2	43,8	63,0
60/120	0,8	24,8	45,2	63,0

Der gleiche Zusammenhang wird auch am Beispiel von Andesit verdeutlicht. Bei den Aufgabefractionen 32/63 mm und 60/120 mm liegen die Kurven der Partikelgrößenverteilung der beiden Produkte nah beieinander und überschneiden sich (siehe Abbildung 40 und Tabelle 16), obwohl das Zerkleinerungsverhältnis bei der Fraktion 32/63 mm ($\varepsilon_{50} = 1,2$) um 20 % niedriger liegt als bei Kalkstein ($\varepsilon_{50} = 1,5$).

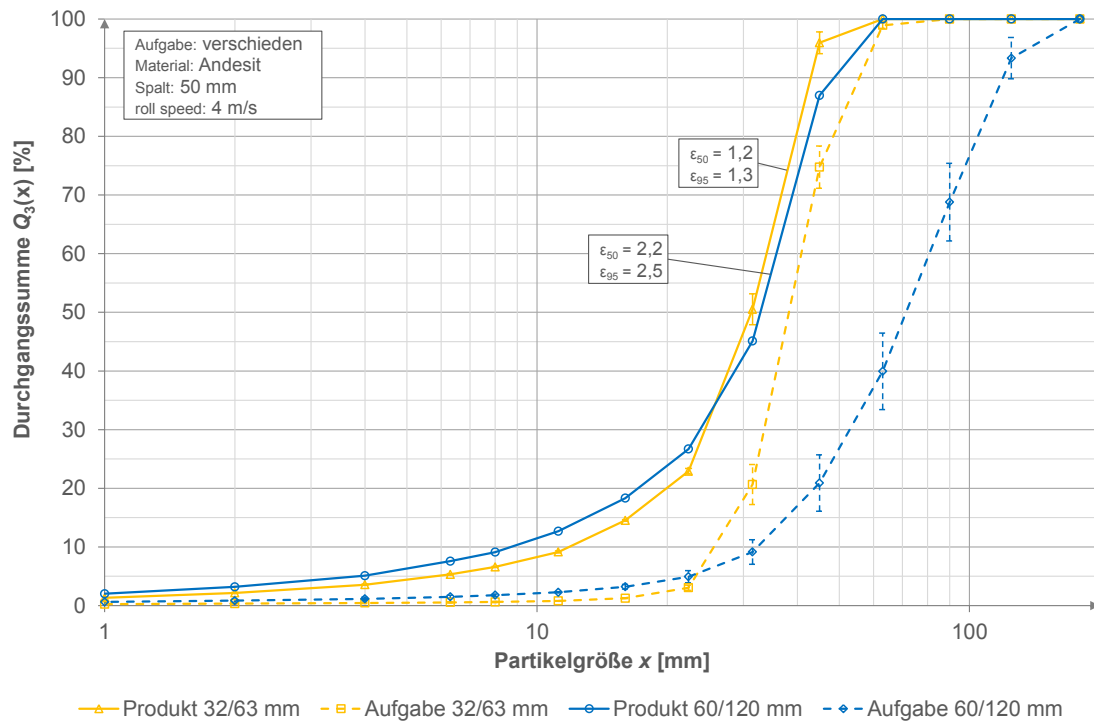


Abbildung 40: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit von der Aufgabeverteilung für Andesit, Spaltweite 50 mm, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s

Tabelle 16: Kennwerte der Produktpartikelgrößenverteilung zu Abbildung 40 für Andesit, Aufgabefraktion verschieden, Spaltweite 50 mm, Umfangsgeschwindigkeit 4 m/s

Aufgabefraktion [mm]	$x_{P,5}$ [mm]	$x_{P,50}$ [mm]	$x_{P,95}$ [mm]	$x_{P,max}$ [mm]
32/63	5,9	31,3	44,7	63,0
60/120	3,9	33,1	56,1	63,0

4.2.4 Einfluss des Aufgabematerials

Der Einfluss der Art des Aufgabematerials wird für eine Spaltweite von 50 mm und die Fraktion 32/63 mm anhand aller drei Materialien gezeigt, siehe dazu Abbildung 41. Es ist zu erkennen, dass der Kalkstein feiner bricht, während die Produktkurven für Andesit und Diabas eng beieinander liegen. Dies zeigen auch die Kennwerte der Partikelgrößenverteilung, siehe dazu Tabelle 17. Bei der Bewertung ist jedoch zu beachten, dass die Aufgabefraktion des Kalksteins bereits einen höheren Feinanteil gegenüber den anderen beiden besitzt, was sich demzufolge zusätzlich in einer feineren Produktkurve zeigt.

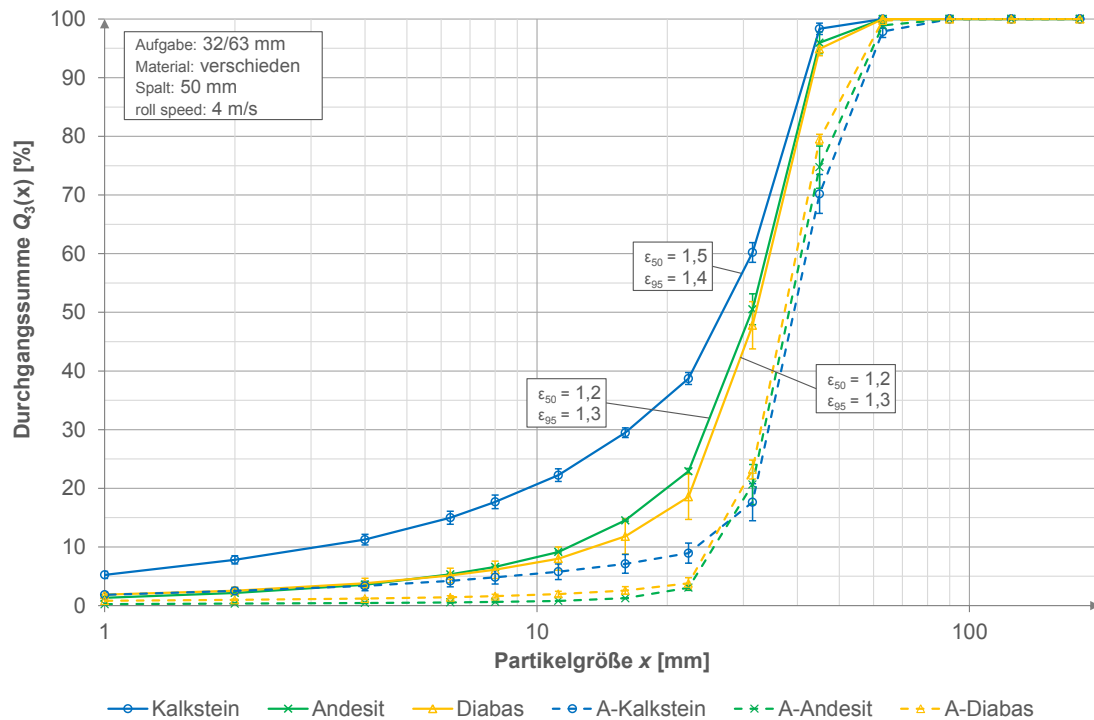


Abbildung 41: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit von der Materialart der Aufgabefraktion 32/63 mm, Spaltweite 50 mm, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s; A...Aufgabe

Tabelle 17: Kennwerte der Produktpartikelgrößenverteilung zu Abbildung 41, Aufgabematerial der Fraktion 32/63 mm verschieden, Spaltweite 50 mm, Umfangsgeschwindigkeit 4 m/s

Material	$x_{P,5}$ [mm]	$x_{P,50}$ [mm]	$x_{P,95}$ [mm]	$x_{P,max}$ [mm]
Kalkstein	1,1	25,3	43,3	63,0
Andesit	5,9	31,3	44,7	63,0
Diabas	6,1	32,1	45,3	63,0

Die Aufgabefraktion 60/120 mm wurde nur mit Kalkstein und Andesit für alle drei Spalte getestet. Für eine Spaltweite von 50 mm (siehe Abbildung 79 im Anhang A.2) bzw. von 70 mm (Abbildung 80 im Anhang A.2) ergibt sich der gleiche Zusammenhang, wie zuvor bei der Fraktion 32/63 mm beschrieben. Bei Kalkstein ergibt sich eine feinere Produktkurve als bei Andesit, wobei für eine Spaltweite von 70 mm für den Bereich $x > 45$ mm die Kalksteinkurve auf die Kurve von Andesit fällt. Die Abbildung 42 zeigt die Produktkurven für 90 mm Spaltweite. Hier fallen die Kurven von Kalkstein und Andesit größtenteils zusammen und überschneiden sich mehrfach, obwohl die Aufgabeverteilung unterschiedlich ist. Das bedeutet, dass für Kalkstein mit größer werdender Spaltweite zunehmend weniger Feinanteil als bei den anderen Materialien entsteht. Ursächlich hierfür dürfte das unterschiedliche Materialverhalten von Kalkstein und Andesit bei Druckbeanspruchung sein. Vor allem bei kleineren Spaltweiten bzw. höheren Zerkleinerungsverhältnissen und großen Einzelpartikeln neigt der Kalkstein zur Ausbildung eines Gutbetts, was in einem höheren Feinanteil resultiert. Dieser Mechanismus verliert für größere Spaltweiten zunehmend an Bedeutung, da die Zerkleinerungsverhältnisse entsprechend sinken. Dieses Materialverhalten wurde für Dolomit bereits bei Zerkleinerungsversuchen von KLICHOWICZ [61] im Drucktopf einer Stempelpresse nachgewiesen. In der

Abbildung 42 liegt die Produktkurve von Kalkstein im feinen Bereich unter der Kurve der Aufgabe. Dieser Unterschied ist mit der Schwankung in der Aufgabeverteilung zu begründen.

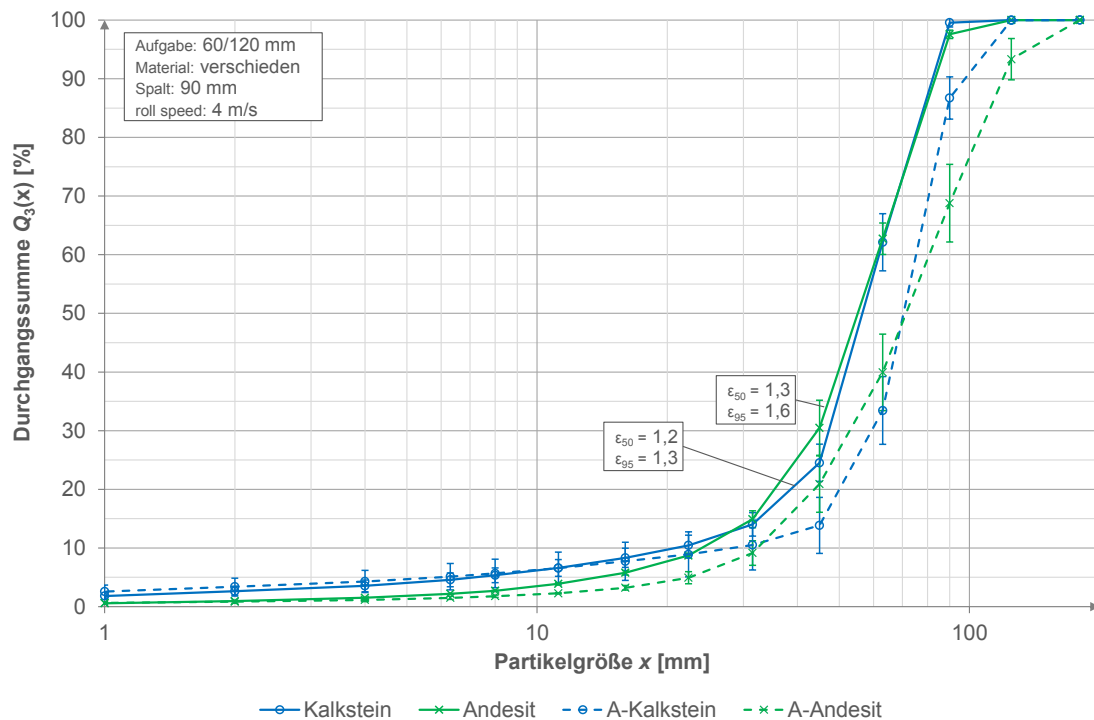


Abbildung 42: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit von der Materialart der Aufgabefraktion 60/120 mm, Spaltweite 90 mm, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s; A...Aufgabe

4.2.5 Zusammenfassung

Die Versuche mit verschiedenen Walzenumfangsgeschwindigkeiten von 2 m/s bis 8 m/s zeigen, dass zwischen Zerkleinerungsprodukt und Umfangsgeschwindigkeit ein Zusammenhang besteht. Abhängig vom Verhältnis der Aufgabepartikelgröße zur Spaltweite ergeben sich jedoch gegensätzliche Tendenzen. Ist das Material überwiegend größer als der Walzenspalt, so wird das Produkt mit zunehmender Walzenumfangsgeschwindigkeit feiner. Bei überwiegend kleinerem Material gegenüber der Spaltweite ergibt sich mit höherer Umfangsgeschwindigkeit ein gröberes Produkt. Die Kurven der Partikelgrößenverteilung liegen im Allgemeinen dicht beieinander. Die Unterschiede bei der Durchgangssumme der Produkte liegen in Einzelfällen bei maximal ca. 12 %. Unter Einbeziehung der Schwankungsbereiche der Produktkurven liegen diese teilweise übereinander. Insgesamt lässt sich durch die Variation der Walzenumfangsgeschwindigkeit die Partikelgrößenverteilung des Zerkleinerungsproduktes nur geringfügig beeinflussen. Der größte Einfluss wurde bei einem Walzenspalt von 50 mm und der Fraktion 32/63 mm festgestellt. Hier betrug die Abweichung des $x_{P,50}$ -Wertes 17 % ($x_{P,50}$ -Wert bei 2 m/s entspricht 100 %). Die Veränderung der Spaltweite von 90 mm auf 50 mm bei der Aufgabefraktion Kalkstein 60/120 mm ergibt die größte Verringerung des $x_{P,50}$ -Wertes um ca. 57 %.

Der Einfluss der Partikelgrößenverteilung der Aufgabefraktion ist gering, wenn der $x_{A,50}$ -Wert des Aufgabematerials im Bereich oder oberhalb der Spaltweite liegt. Einen stärkeren Einfluss

besitzt hier die Spaltweite. Die Produktkurven bei einer Spaltweite von 50 mm fallen trotz der signifikant unterschiedlichen Aufgabeverteilungen der Fraktionen 32/63 mm und 60/120 mm des Kalksteins in einen engen Bereich zusammen.

Die Variation der Art des Aufgabematerials zeigt, dass Andesit und Diabas im Allgemeinen gröber brechen als Kalkstein. Mit zunehmender Spaltweite entsteht jedoch für Kalkstein auch zunehmend weniger Feinanteil. Dieser Zusammenhang dürfte jedoch auf das unterschiedliche Materialverhalten von Kalkstein und Andesit bei Druckbeanspruchung zurückzuführen sein.

4.3 Massedurchsatz

Zur Untersuchung des Massedurchsatzes werden die Rohdaten ausgewertet, welche während der stationären Versuchsphase und der An- bzw. Abfahrphase eines jeden Versuchs aufgezeichnet werden. Die Ermittlung des Durchsatzes erfolgt durch Mittelwertbildung der Rohdaten der stationären Phase, siehe dazu Abbildung 43. Die Kurve zeigt die Rohdaten der gesamten Versuchsdauer, wobei der gelbe Abschnitt der Kurve die stationäre Phase kennzeichnet. Der gemittelte Wert der stationären Phase wird mit dem Parameter \dot{m}_{Mess} bezeichnet.

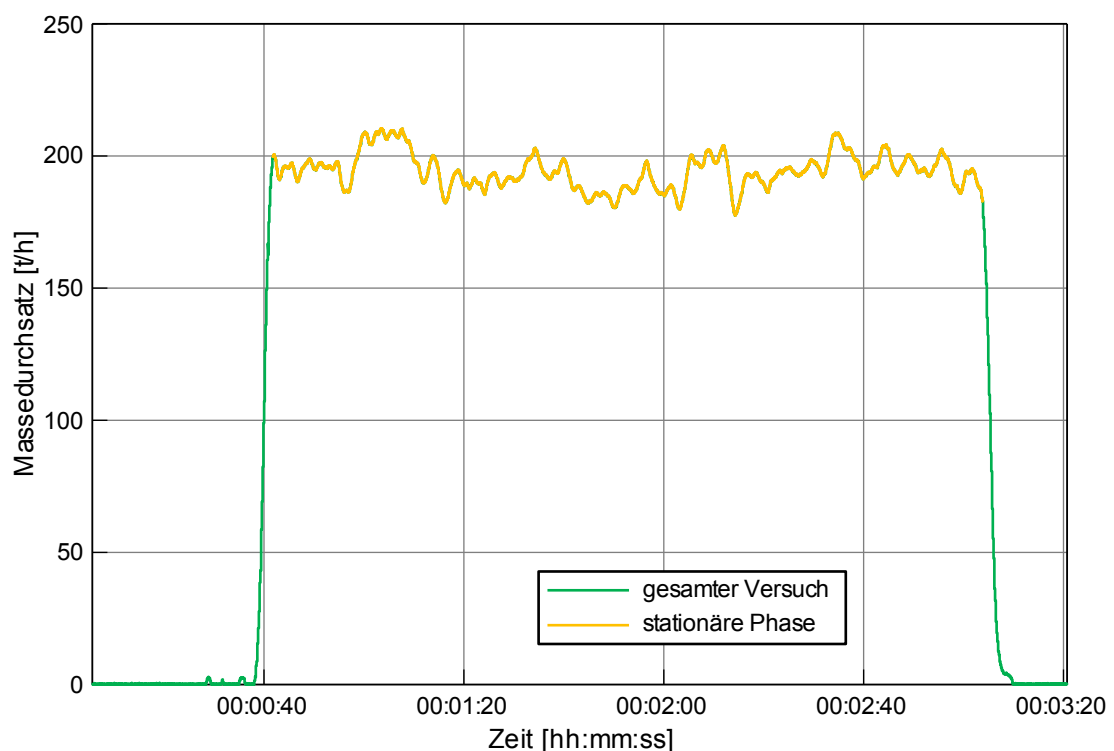


Abbildung 43: Messschrieb eines Versuchs mit gekennzeichneteter stationärer Phase (gelber Abschnitt)

Die direkten Messwerte der Bandwaage unterliegen einem beladungsabhängigen Fehler (siehe Kapitel 3.1.4), welcher vor Auswertung des Durchsatzes korrigiert wird. Die Korrektur erfolgt nach Formel (3.2) aus Kapitel 3.1.4, in dem der gemessene mittlere Durchsatz \dot{m}_{Mess} mit dem ermittelten Korrekturfaktor k_{BW} multipliziert wird.

Wie in der Versuchsdurchführung im Kapitel 3.4.1 beschrieben, wird der Brecher ständig am Durchsatzmaximum gefahren. Dabei wird stets der Durchlaufbetrieb ohne Materialanhäufung

oberhalb der Walzen angestrebt. Durch Ungleichmäßigkeiten in der Materialzuführung lässt sich jedoch eine zweizeitweise Überschüttung des Brechraumes nicht vollständig vermeiden. Daher wurde ein Versuch durchgeführt, bei dem zunächst in der stationären Phase im Durchlaufbetrieb und anschließend bewusst mit Überschüttung des Brechraums gefahren wurde, sodass die Walzen komplett mit Material bedeckt waren. Die Abbildung 44 und Abbildung 45 zeigen Beispiele der beiden Betriebszustände während des Versuchs.

In Abbildung 46 ist der zu diesem Versuch zugehörige Massedurchsatz-Zeitverlauf dargestellt. Die Bereiche unterschiedlicher Betriebsweise sind entsprechend gekennzeichnet. Wie zu erkennen ist, gibt es zwischen Durchlauf- (369 t/h) und Überschüttungsbetrieb (362 t/h) hinsichtlich des gemittelten Durchsatzes keinen signifikanten Unterschied. Im Überschüttungsbetrieb scheint dagegen die Messkurve weniger zu schwanken als bei freier Aufgabe. Im Falle der dauerhaften Überschüttung dürfte sich jedoch der Verschleiß der Walzen enorm erhöhen, was es in der Praxis zu vermeiden gilt.



Abbildung 44: Durchlaufbetrieb



Abbildung 45: Betrieb mit überschüttetem Brechraum

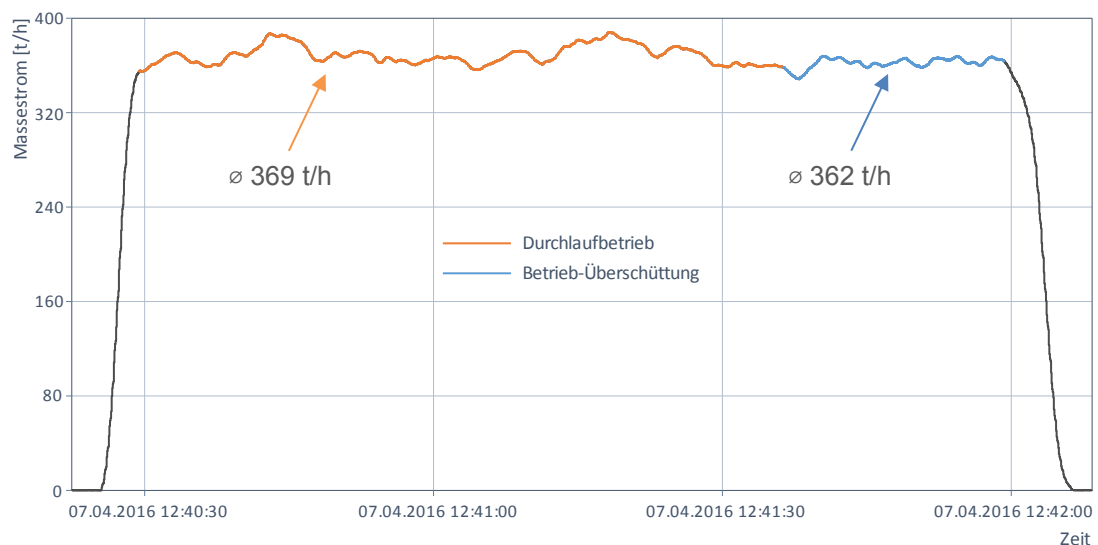


Abbildung 46: Massedurchsatz-Zeitverlauf eines Versuchs mit Durchlaufbetrieb und überschüttetem Brechraum

In der Auswertung des Massedurchsatzes wird auch auf die Abhängigkeit des Füllungsgrades φ_{F1} eingegangen. Dieser Parameter errechnet sich nach Gleichung (4.4) durch

Umstellen von Formel (2.26) aus Kapitel 2.3.2 und Einsetzen von $A_s = s_{\text{äq}} \cdot L_W$. Es gilt die Annahme, dass die Walzenumfangsgeschwindigkeit am Äquivalenzradius und die Materialgeschwindigkeit im engsten Spalt gleich sind. Der Füllungsgrad φ_{F1} bezieht sich weiterhin auf die Schüttdichte ϱ_{Sch} des Materials.

$$\text{Füllungsgrad} \quad \varphi_{F1} = \frac{\dot{m}}{v_{U,\text{äq}} \cdot s_{\text{äq}} \cdot L_W \cdot \varrho_{\text{Sch}}} \quad (4.4)$$

Da der Versuchswalzenbrecher profilierte Walzen hat, kann zur Berechnung des Füllungsgrades nicht der Nennspalt s_{r5} genutzt werden. Zur Berücksichtigung der Zähne wird daher der Äquivalenzspalt $s_{\text{äq}}$ einer volumengleichen Walze mit einem Äquivalenzdurchmesser $D_{W,\text{äq}}$ errechnet. Unter Beachtung des am Versuchswalzenbrechers genutzten Walzenprofils (siehe Kapitel 3.1.3) ergibt sich für die vorliegende Walze ein Wert von $D_{W,\text{äq}} = 390$ mm. Der sich bei diesem Durchmesser ergebende Äquivalenzspalt ist folglich um 10 mm kleiner als der Nennspalt s_{r5} , siehe Tabelle 18. Die Berechnung von $D_{W,\text{äq}}$ und $s_{\text{äq}}$ kann dem Anhang C entnommen werden.

Tabelle 18: Nennspaltweite, Achsabstand der Walzen und Äquivalenzspaltweite

Nennspalt s_{r5} [mm]	Achsabstand a_W [mm]	Äquivalenzspalt $s_{\text{äq}}$ [mm]
50	430	40
70	450	60
90	470	80

Für Gleichung (4.4) gilt die Annahme, dass die Materialgeschwindigkeit im engsten Walzenspalt der Walzenumfangsgeschwindigkeit entspricht. Für Glattwalzen gilt die Geschwindigkeit am Radius R_W . Da es sich beim Versuchsbrecher aber um profilierte Walzen handelt, wird hier mit der Walzenumfangsgeschwindigkeit am Äquivalenzradius $R_{\text{äq}}$ gemäß Tabelle 19 gerechnet, um die Profilierung zu berücksichtigen.

Tabelle 19: Walzendrehzahl, Walzenumfangsgeschwindigkeit an der Zahnschnecke und am Äquivalenzdurchmesser

Walzendrehzahl n_W [min ⁻¹]	Walzenumfangsgeschw. (Zahnschnecke) v_U [m/s]	Walzenumfangsgeschw. (Äquivalenzradius) $v_{U,\text{äq}}$ [m/s]
84,9	2	1,7
169,8	4	3,5
254,6	6	5,2
339,5	8	6,9

Weiterhin wird zur Berechnung des Füllungsgrades φ_{F1} die Schüttdichte ϱ_{Sch} der jeweiligen Fraktion verwendet. Im Anschluss folgt die Auswertung der Abhängigkeit des Durchsatzes von der Walzenumfangsgeschwindigkeit und des Aufgabematerials, der Spaltweite sowie der Aufgabepartikelgröße.

4.3.1 Einfluss der Walzenumfangsgeschwindigkeit und der Festigkeit des Aufgabematerials

Die Abbildung 47 zeigt den Massedurchsatz in Abhängigkeit von der Walzenumfangsgeschwindigkeit (variiert von 2 m/s bis 8 m/s) für verschiedene Aufgabefractionen und Aufgabematerialien bei 50 mm Spaltweite. Es ist zu erkennen, dass der Massedurchsatz zunächst mit zunehmender Geschwindigkeit abhängig von der Fraktionsgröße bis zu einer bestimmten Umfangsgeschwindigkeit steigt und danach stagniert oder sogar abfällt. Es werden maximale Durchsätze von ca. 600 t/h im Fall der Fraktion 3/32 mm und 8 m/s erreicht. Für die Fraktion 60/120 mm ergeben sich maximal nur ca. 100 t/h.

Bei allen Fraktionen erfolgt die Steigerung des Massedurchsatzes nicht linear sondern degressiv. Das bedeutet, dass die Durchsatzsteigerung mit zunehmender Walzenumfangsgeschwindigkeit immer kleiner wird und im Fall der Kalksteinfraktionen 32/63 mm und 63/120 mm bei 8 m/s sogar abfällt. Der Anstieg der Kurven ordnet sich abfallend nach Fraktionsgrößen, beginnend mit dem größten Anstieg bei der Fraktion 3/32 mm. Beispielsweise wird bei dieser Fraktion bei Verdopplung der Umfangsgeschwindigkeit von 2 m/s auf 4 m/s der Durchsatz mehr als verdoppelt (von 176 t/h auf 373 t/h) während die Steigerung bei der Kalksteinfraktion 32/63 mm nur das 1,7-fache beträgt.

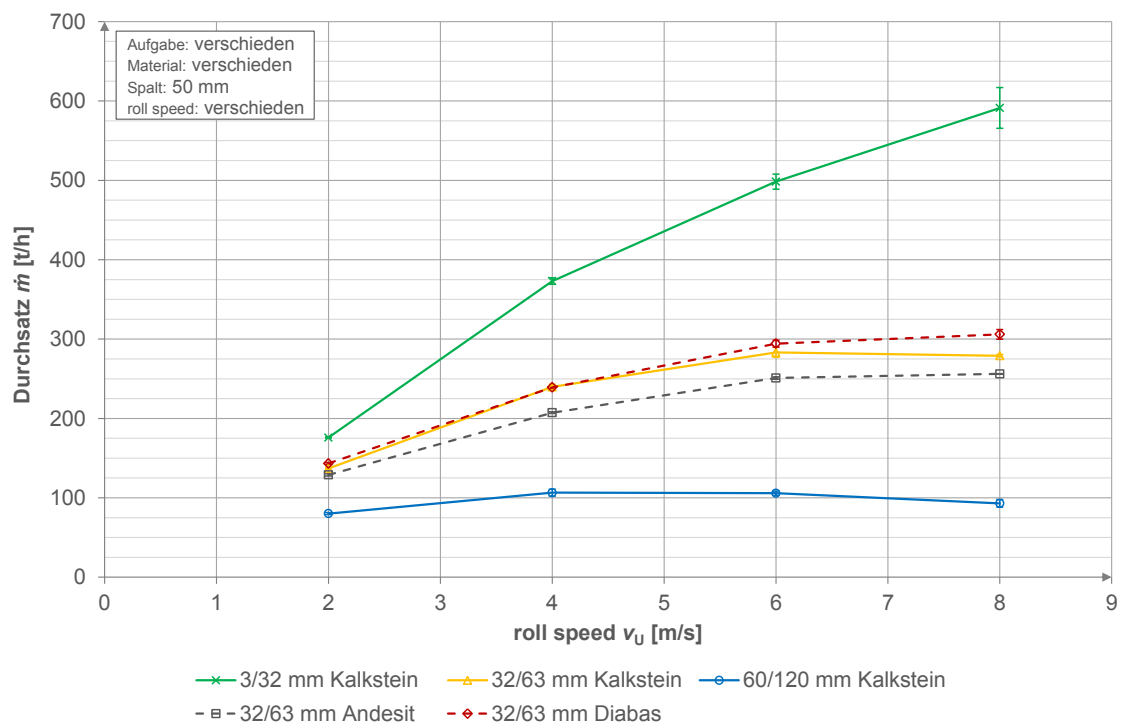


Abbildung 47: Massedurchsatz in Abhängigkeit von der Walzenumfangsgeschwindigkeit für verschiedene Materialien und Aufgabefractionen, Spaltweite 50 mm

Abhängig von den Einzugsbedingungen scheint es eine Grenzgeschwindigkeit zu geben, bei welcher der maximale Durchsatz erreicht ist. Eine weitere Erhöhung der Walzenumfangsgeschwindigkeit führt offensichtlich wieder zu einer Durchsatzminderung. Eine Erklärung hierfür ist u. a., dass sich die Einzugsbedingungen des Materials mit zunehmender Geschwindigkeit verschlechtern und es vermehrt zum „Tanzen“ bzw. Verweilen des Materials auf den Brech-

walzen kommt. Dabei werden lediglich kleine Teile der Partikel abgetrennt, aber es kommt zu keinem Einzug des Gesamtpartikels in den Brechspalt. Dies tritt umso früher ein, je größer das aufgegebene Material ist.

Der Materialeinfluss auf das Einzugsverhalten kann für unterschiedliche Materialien anhand der Fraktion 32/63 mm in Abbildung 47 nachvollzogen werden, da die Aufgabeverteilung der drei Materialien hinreichend gut vergleichbar ist. Die Kurven der drei Materialien zeigen qualitativ den gleichen Verlauf, wobei die Kurven von Kalkstein und Diabas bis 6 m/s dicht beieinander liegen. Die Kurve des Andesits liegt durchschnittlich ca. 13 % unter der von Diabas. Dies ist teilweise mit den unterschiedlichen Rohdichten zu erklären, die bei Andesit ca. 5 % unter der des Diabases liegt. Die restliche Abweichung könnte mit der Aufgabeverteilung der beiden Gesteine begründet werden, da die Verteilung des Diabases feiner als die des Andesits ist. Zusammenfassend ist festzustellen, dass bei sonst gleichen Parametern kein signifikanter Einfluss der Materialfestigkeit auf das Einzugsverhalten und folglich den Massedurchsatz nachgewiesen werden konnte.

Für 70 mm und 90 mm Spaltweite sind die Abbildung 81 und Abbildung 82 im Anhang A.3 einzusehen. Bei diesen beiden Spaltweiten ergeben sich für die dargestellten Kurven qualitativ die gleichen Zusammenhänge wie für 50 mm. Bei 70 mm Spaltweite ergibt sich der größtmöglich gemessene Massedurchsatz aller Versuche von 785 t/h für die Fraktion 3/32 mm bei 6 m/s Umfangsgeschwindigkeit. Im Diagramm für 90 mm ist auch die Kurve der Aufgabefraktion 60/120 mm des Andesits mit eingezeichnet. Diese liegt aufgrund der gröberen Verteilung, vor allem im oberen Partikelgrößenbereich, unter der Durchsatzkurve von Kalkstein der Fraktion 60/120 mm.

4.3.2 Einfluss der Spaltweite

Die Auswertung bzw. Darstellung des Einflusses der Spaltweite auf den Massedurchsatz wird anhand der Ergebnisse für eine Walzenumfangsgeschwindigkeit von 4 m/s durchgeführt, da für diesen Versuchspunkt die meisten Daten vorliegen. Die Abbildung 48 zeigt die Abhängigkeiten für unterschiedliche Aufgabefractionen des Kalksteins. Es ist zu erkennen, dass der Durchsatz erwartungsgemäß mit größer werdendem Spalt steigt. Für alle Kurven ist dieser Zusammenhang annähernd linear bei ähnlich großem Anstieg. Für die Fraktionen 3/32 mm, 62/63 mm und die Mischung 1-2-1 bringt die Vergrößerung des Spaltes um 40 mm (Vergrößerung um Faktor 2,0, bezogen auf den Äquivalenzspalt) durchschnittlich auch eine Vergrößerung des Massedurchsatzes um den Faktor 2. Lediglich bei der Fraktion 60/120 mm und der Mischung 1-1-4 liegt der Faktor mit ca. 2,9 höher, da hier bei einer Spaltweite von 50 mm der Durchsatz aufgrund der schlechten Einzugsbedingungen niedrig ist und damit eine größere Steigerung im Vergleich zu den anderen Fraktionen bzw. Mischungen möglich ist.

Die Kurven für eine Umfangsgeschwindigkeit von 2 m/s, 6 m/s sowie 8 m/s sind in der Abbildung 83 bis Abbildung 85 im Anhang A.3 dargestellt. Auch hier ergeben sich qualitativ ähnliche Zusammenhänge wie bei 4 m/s. Mit zunehmender Walzenumfangsgeschwindigkeit sinkt das

Verhältnis der Durchsatzsteigerung von 50 mm auf 90 mm Spaltweite für die oben genannten Fraktionen leicht unter 2. Dies dürfte wiederum mit den zunehmend schlechteren Einzugsbedingungen für höhere Walzenumfangsgeschwindigkeiten zu begründen sein

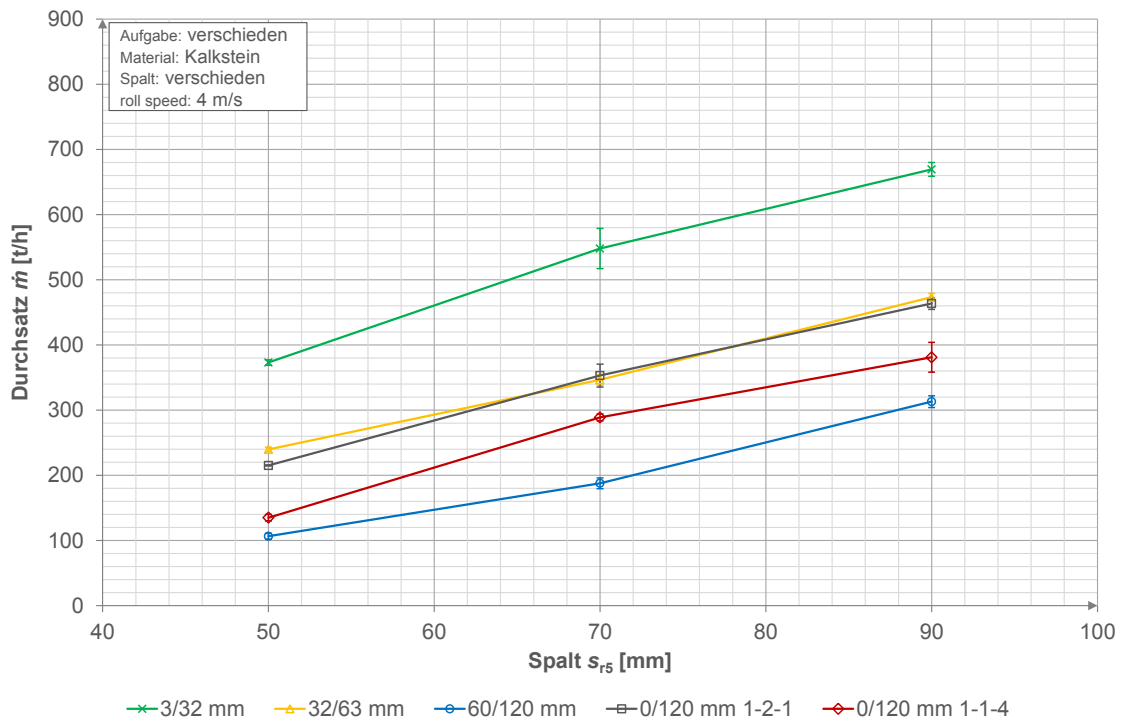


Abbildung 48: Massedurchsatz in Abhängigkeit von der Spaltweite für Kalkstein für verschiedene Aufgabefractionen, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s

An dieser Stelle wird in Abbildung 49 auch die Abhängigkeit des Verhältnisses \dot{m}/s_{aq} von der Spaltweite für 4 m/s Umfangsgeschwindigkeit gezeigt. Das Verhältnis \dot{m}/s_{aq} steht hierbei stellvertretend für den Füllungsgrad φ_{F1} , da dieser laut Formel (4.4) neben den Konstanten $v_{U,aq}$, L_W und ϱ_{Sch} auch von den variablen Parametern \dot{m} und s_{aq} abhängt.

Für die Fraktionen 3/32 mm und 32/63 mm bleibt das Verhältnis \dot{m}/s_{aq} annähernd konstant. Die anderen Fraktionen bzw. Mischungen mit Anteilen größer als 32/63 mm weisen hingegen für den Datenpunkt bei einer Spaltweite von 50 mm ein geringeres Verhältnis \dot{m}/s_{aq} als bei den beiden größeren Spaltweiten auf. Dies ist bedingt durch das bei diesem Spalt schlechtere Einzugsverhalten der Fraktion 60/120 mm. Bei 70 mm und 90 mm Spaltweite bleibt das Verhältnis \dot{m}/s_{aq} weitestgehend konstant. Dies zeigen auch die Daten für weitere Walzenumfangsgeschwindigkeiten.

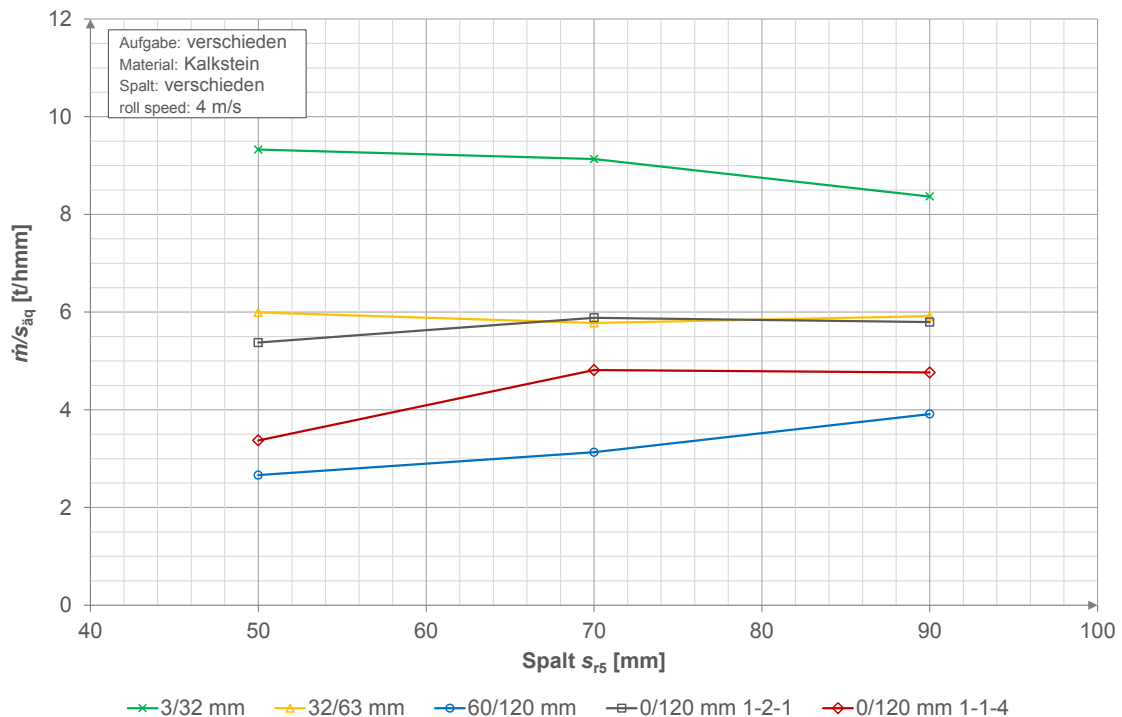


Abbildung 49: Verhältnis $\dot{m}/s_{\ddot{a}q}$ in Abhängigkeit von der Spaltweite für Kalkstein für verschiedene Aufgabefraktionen, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Durchsatz im untersuchten Bereich durch eine Verdopplung der Spaltweite ebenfalls verdoppelt werden kann, solange die Einzugsbedingungen hinreichend gut erfüllt sind. Weiterhin scheint für gute Einzugsbedingungen das Verhältnis $\dot{m}/s_{\ddot{a}q}$ und demzufolge auch der Füllungsgrad entgegen der Darstellung in der Literatur (siehe Kapitel 2.3.2) weitestgehend unabhängig von der Spaltweite zu sein.

4.3.3 Einfluss der Aufgabepartikelgröße

Die Abbildung 50 zeigt den Zusammenhang von Massedurchsatz und Partikelgröße für Kalkstein bei einer Walzenumfangsgeschwindigkeit von 4 m/s. Die Vorgehensweise zur Berechnung der Massedurchsätze der Überpartikelfraktionen kann im Kapitel 5.2.1 nachgelesen werden. Erwartungsgemäß fällt der Durchsatz mit zunehmender Partikelgröße ab. Für nicht sofort einziehbare Partikelgrößen (ab $x_{A,95} = 150$ mm) ist der Durchsatz minimal und sinkt mit weiter steigender Partikelgröße nur noch unwesentlich ab. Beispielsweise sinkt er bei einer Spaltweite von 90 mm von 310 t/h (bei der letzten sofort einziehbaren Fraktion 60/120 mm) auf ca. 20 t/h (für die erste Überpartikelfraktion von 120/160 mm), was einer Verringerung um 93,5 % entspricht. Der Abfall ist umso stärker, je höher die Walzenumfangsgeschwindigkeit ist (siehe dazu die Diagramme in Abbildung 86 bis Abbildung 88 im Anhang A.3).

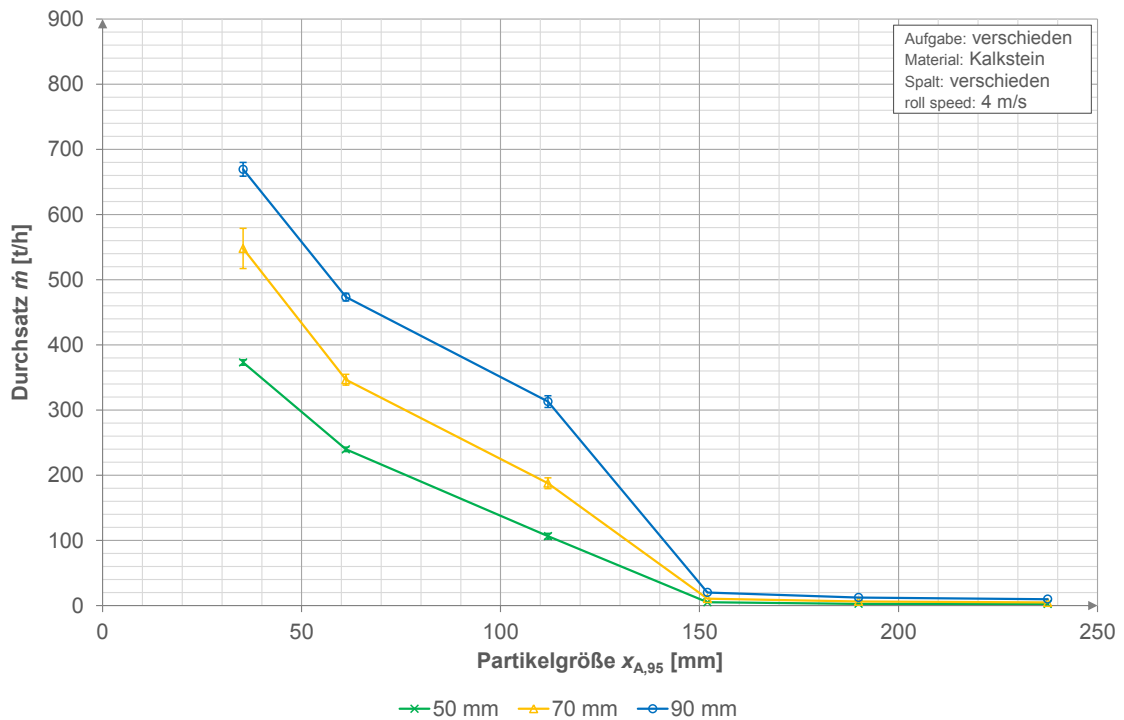


Abbildung 50: Massedurchsatz in Abhängigkeit von der Aufgabepartikelgröße für Kalkstein für verschiedene Spaltweiten, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s

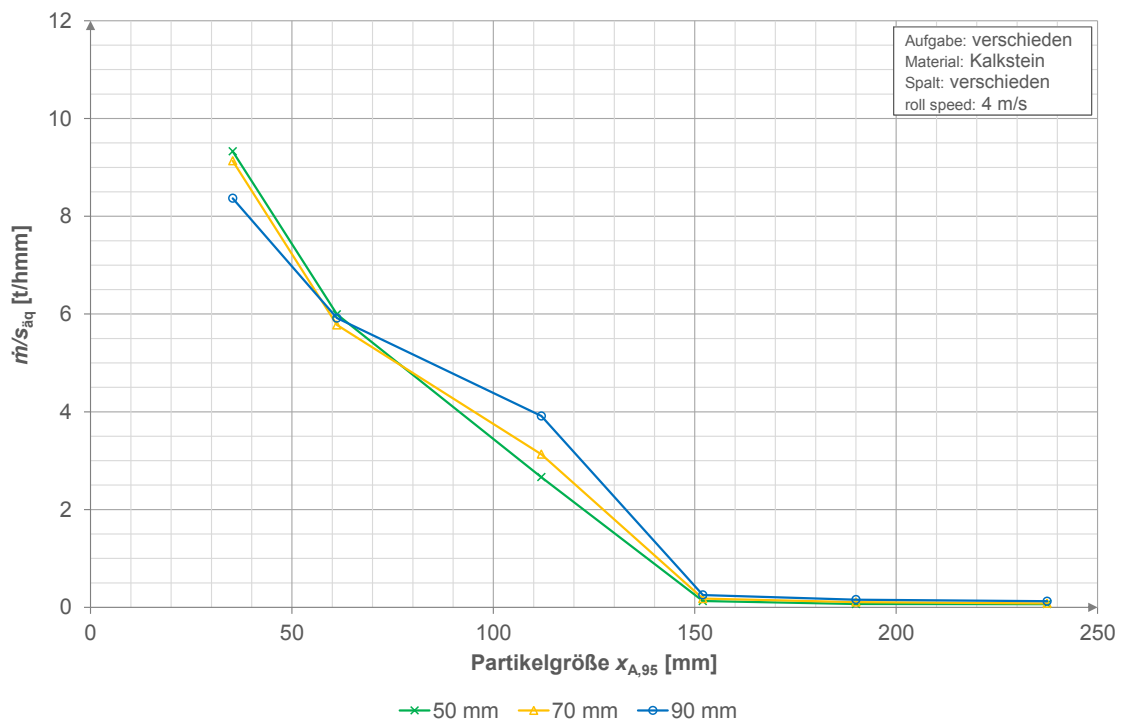


Abbildung 51: Verhältnis $\dot{m}/s_{\text{äq}}$ in Abhängigkeit von der Aufgabepartikelgröße für Kalkstein für verschiedene Spaltweiten, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s

Wird nun das Verhältnis $\dot{m}/s_{\text{äq}}$ über der Partikelgröße aufgetragen, so ergibt sich Abbildung 51. Wie bereits in anderen Diagrammen gezeigt, fallen auch hier die Datenpunkte für eine Partikelgröße und unterschiedliche Spaltweiten annähernd in einem Punkt zusammen. Lediglich für die Fraktion 60/120 mm ergeben sich aus den bereits genannten Gründen größere Abweichungen. Generell fällt das Verhältnis $\dot{m}/s_{\text{äq}}$ mit zunehmender Partikelgröße stetig ab, für

eine Spaltweite von 50 mm in weiten Teilen linear bis zur Fraktion 60/120 mm. Mit steigender Walzenumfangsgeschwindigkeit weichen die Kurven jedoch zunehmend von einem linearen Zusammenhang ab (siehe die Diagramme in Abbildung 89 bis Abbildung 91 im Anhang A.3).

4.3.4 Zusammenfassung

Die Versuche mit verschiedenen Walzenumfangsgeschwindigkeiten von 2 m/s bis 8 m/s zeigen, dass der Massedurchsatz mit zunehmender Umfangsgeschwindigkeit bis zu einem bestimmten Punkt steigt und abhängig von der Fraktionsgröße anschließend stagniert oder sogar abfällt. Die Durchsatzsteigerung wird dabei bis zum Abfall zunehmend kleiner. Der Anstieg der Durchsatz-Geschwindigkeitskurve ordnet sich abfallend nach der Partikelgröße, beginnend mit dem größten Anstieg bei der kleinsten Partikelgrößenfraktion. Der Abfall tritt abhängig von den Einzugsbedingungen umso früher ein, je größer die Partikel sind bzw. je kleiner die Spaltweite ist.

Weiterhin konnte in den Untersuchungen für den Massedurchsatz keine Abhängigkeit von der Materialfestigkeit nachgewiesen werden. Die drei Gesteine Kalkstein, Andesit und Diabas mit signifikanten Unterschieden in der Druckfestigkeit zeigen das gleiche Einzugsverhalten und es ergeben sich folglich bei sonst gleichen Bedingungen auch die gleichen Massedurchsätze.

Hinsichtlich des Einflusses der Spaltweite auf den Durchsatz zeigen die Versuche, dass bei hinreichend guten Einzugsbedingungen eine Verdopplung der Spaltweite auch den Massedurchsatz um den Faktor zwei erhöht. Dabei ist der Füllungsgrad weitestgehend unabhängig von der Spaltweite.

Die Aufgabepartikelgrößenverteilung beeinflusst den Durchsatz stark. Für sofort einziehbare Partikelgrößen fällt der Durchsatz mit steigender Partikelgröße stetig ab, wobei er für die erste nicht sofort einziehbare Partikelgröße (Überpartikel) ein Minimum erreicht. Für weiter steigende Überpartikelgrößen sinkt der Durchsatz dann nur unwesentlich. Beispielsweise fällt er bei einer Spaltweite von 90 mm von 310 t/h (bei der letzten sofort einziehbaren Fraktion 60/120 mm) auf ca. 20 t/h (für die erste Überpartikelfraktion von 120/160 mm), was einer Verringerung um 93,5 % entspricht

5 Modellbildung

In den folgenden Kapiteln werden Modelle zur verbesserten Prognose der Produktpartikelgrößenverteilung und des Grenzmassedurchsatzes für Walzenbrecher aufgestellt. Dabei soll besonders für die Durchsatzprognose der Einfluss von übergroßen Partikeln berücksichtigt werden. Anschließend werden die Modelle mit den tatsächlich ermittelten Werten aus den Versuchen verifiziert und auf ihre Eignung geprüft.

5.1 Partikelgrößenverteilung des Produktes

Im Abschnitt 2.3.3 wurden verschiedene Methoden zur Beschreibung der Partikelgrößenverteilung des Produktes dargestellt. Im Rahmen einer Arbeit von Xu [62] wurde bereits die Eignung des WHITEN-Modells, welches auf einer Klassier- und Bruchfunktion basiert, für den hier verwendeten Versuchswalzenbrecher für Kalkstein überprüft. Im Ergebnis zeigte sich, dass dieser Ansatz nur für bestimmte Einstellungen gut funktioniert und teilweise größere Abweichungen zu den Versuchen aufweist, vor allem bei höheren Zerkleinerungsgraden. Das Modell kann entweder für den Grob- oder den Feinbereich angepasst werden, wo es dann eine gute Übereinstimmung liefert. Die Gründe liegen u. a. darin, dass für das verwendete Versuchsmaterial keine Bruchfunktion experimentell ermittelt werden konnte und daher auf Literaturwerte zurückgegriffen wurde.

Da mit dem WHITEN-Modell kein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt werden konnte, soll im Folgenden die neue und nach der Literatur vielversprechende Swebrec-Funktion als Verteilungsfunktion zur Prognose der Produktverteilung verwendet werden. Zunächst wird jedoch ihre Eignung für ein Modell überprüft. Anschließend besteht das Ziel darin, für die drei Parameter x_{\max} , x_{50} und b , welche die Swebrec-Funktion bestimmen, Abhängigkeiten von den Einstellgrößen des Walzenbrechers zu finden. Wenn diese drei Parameter prognostiziert werden können, ist auch eine Prognose der Produktpartikelgrößenverteilung möglich.

Da die Datenbasis für Andesit und Diabas klein ist, wird die Modellfindung aufgrund der umfangreichen Daten für Kalkstein durchgeführt. Die Untersuchung wird aber nur für eine Walzenumfangsgeschwindigkeit von 4 m/s erfolgen, da der Einfluss der Walzenumfangsgeschwindigkeit auf die Produktpartikelgrößenverteilung ohnehin gering ist, wie die Auswertung in Kapitel 4.2.1 zeigt. Das Vorgehen gestaltet sich wie folgt: Zunächst werden alle ermittelten Siebkurven einer Kurvenanpassung mittels der Swebrec-Funktion unterzogen, um zu prüfen, ob und wie gut die Swebrec-Funktion die Produkte des Versuchswalzenbrechers abbilden kann. Danach wird der Zusammenhang zwischen den Einstellgrößen des Walzenbrechers und den Parametern der Swebrec-Funktion ermittelt.

5.1.1 Prüfung der Eignung der Swebrec-Funktion

Die Kurvenanpassung der experimentell ermittelten Siebdaten wird mit der Analysesoftware ORIGIN (Version: OriginPro 2015G) durchgeführt. Da die obere Produktpartikelgröße $x_{p,\max}$ maßgeblich von der Spaltweite des Brechers abhängt, wird wie bei OUCHTERLONY [36] die obere

Produktpartikelgröße entsprechend der Auswertung in Kapitel 4.2.2 nach Tabelle 20 festgelegt. Die mit „-“ in Tabelle 20 gekennzeichneten Punkte sind von der Modellbildung ausgenommen, da hier wenig bis keine Zerkleinerungswirkung auftritt.

Tabelle 20: Festlegung der oberen Produktpartikelgröße $x_{P,max}$ in Abhängigkeit des Walzenspaltes und der Aufgabefraktion in mm; für Andesit 60/120 mm bei 90 mm Spaltweite wird $x_{P,max} = 125$ mm gesetzt

Aufgabe Spalt s_{r5}	3/32 mm	32/63 mm	60/120 mm	Mischung (alle)
50	31,5	63	63	63
70	-	63	90	90
90	-	-	90	90

Die anderen beiden Parameter $x_{P,50}$ und b werden mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate angepasst. Ein Beispiel solch einer Kurvenanpassung zeigt die Abbildung 52. Es ist zu erkennen, dass die Kurvenanpassung mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,997$ sehr gut ist. Es ergibt sich $b = 2,2$ und $x_{P,50} = 21,3$ mm. Der experimentell bestimmte $x_{P,50}$ -Wert liegt bei 21,9 mm und weicht damit nur gering zum mit der Kurvenanpassung ermittelten Wert ab.

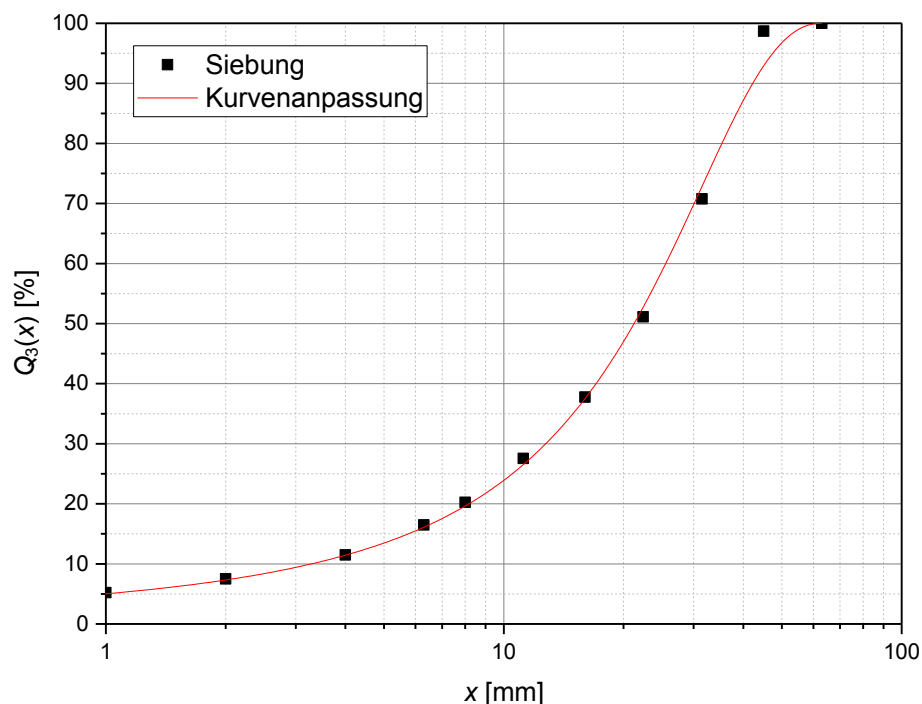


Abbildung 52: Kurvenanpassung mittels Swebrec-Funktion; $R^2 = 0,997$, Swebrec Parameter: $x_{P,max} = 63$ mm, $x_{P,50} = 21,3$ mm, $b = 2,2$, Versuchsparameter: Aufgabe 1-2-1 Kalkstein, Umfangsgeschwindigkeit 4 m/s, Spaltweite 50 mm

Die Kurvenanpassung wurde für alle Produkte der Versuche mit 4 m/s Walzenumfangsgeschwindigkeit durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 21 zusammengefasst. Die Einzelwerte können der

Tabelle 28 bis Tabelle 30 im Anhang B entnommen werden. Die Tabelle 21 zeigt für alle drei Gesteine ein durchgehend hohes Bestimmtheitsmaß von mindestens $R^2 = 0,994$. Demzufolge

wird die Swebrec-Funktion als geeignet zur Beschreibung der Partikelgrößenverteilung von Walzenbrecherprodukten eingestuft.

Tabelle 21: Zusammenfassung der Kurvenanpassung für Kalkstein, Andesit und Diabas, Mittelwerte über alle Spaltweiten bei 4 m/s Umfangsgeschwindigkeit

Gestein	Abweichung $x_{P,50}$ (experimentell-Swebrec) [mm]	b -Wert	R^2
Kalkstein	$1,29 \pm 0,90$ (bzw. 4,2 %)	$2,11 \pm 0,20$	$0,994 \pm 0,004$
Andesit	$0,86 \pm 0,87$ (bzw. 2,4 %)	$2,86 \pm 0,44$	$0,997 \pm 0,002$
Diabas	0,43 (bzw. 1,3 %)	3,16	0,994

Die Abweichung der experimentell und durch die Kurvenanpassung ermittelten $x_{P,50}$ -Werte beträgt im Mittel ca. 1,3 mm bzw. 4,2 % für Kalkstein. Die Abweichung der beiden anderen Gesteine liegt niedriger. Es ergeben sich je nach Gestein unterschiedliche b -Werte. Für Kalkstein liegt dieser bei ca. 2,1 und damit geringfügig unter dem von OUCHTERLONY [36] ermittelten Wert ($b = 2,3$, siehe Kapitel 2.3.3), für Andesit und Diabas mit 2,9 bzw. 3,2 geringfügig darüber. Wie im Kapitel 4.2.4 bereits festgestellt, bricht der Kalkstein feiner, das heißt die Partikelgrößenverteilungskurve verläuft flacher. Dies zeigen wiederum auch die b -Werte, die für Andesit und Diabas höher liegen.

5.1.2 Aufstellen eines Modellansatzes und Erarbeitung der notwendigen Zusammenhänge

Um die Partikelgrößenverteilung eines Produktes auch prognostizieren zu können, müssen Zusammenhänge zwischen den Einstellgrößen des Walzenbrechers und den Parametern der Swebrec-Funktion bestehen.

In Kapitel 4.2 wurde gezeigt, dass die Partikelgrößenverteilung des Produktes eines Materials bei ausreichender Zerkleinerungswirkung maßgeblich vom Walzenspalt abhängt. Um von der Größe des Walzenspalt die obere Partikelgröße abzuleiten, wird das Verhältnis von maximaler Partikelgröße der Produkte $x_{P,max}$ und dem jeweiligem Spalt s_{r5} gebildet. In der Tabelle 22 sind die Werte zusammengefasst. Bei Kalkstein und Andesit der Fraktion 60/120 mm ergeben sich unterschiedliche maximale Produktpartikelgrößen. Bei Kalkstein liegt diese bei 90 mm im Gegensatz zu 125 mm beim gröber brechenden Andesit. Dies ist wahrscheinlich auf das unterschiedliche Bruchverhalten der Gesteine zurückzuführen.

Aus Tabelle 22 kann folgende Formel zur Abschätzung der maximalen Produktpartikelgröße $x_{P,max}$ abgeleitet werden:

$$x_{P,max} = 1,24 \cdot s_{r5} \quad (5.1)$$

Es ist jedoch zu beachten, dass je nach Konfiguration der Walzenprofilierung der Faktor 1,24 abweichen kann. Bei den Versuchen von OUCHTERLONY [36] ergibt sich für Walzenbrecher ein ähnliches Verhältnis von 315 mm/250 mm = 1,26.

Tabelle 22: Maximale Produktpartikelgröße in Abhängigkeit von der Spaltweite, *für Kalkstein der Fraktion 60/120 mm, **für Andesit der Fraktion 60/120 mm

Spalt s_{r5} [mm]	$x_{P,max}$ [mm]	$\frac{x_{P,max}}{s_{r5}}$
50	63	1,26
70	90	1,29
90	90*/125**	1,00/1,39
Mittelwert	-	1,24

Im nächsten Schritt wird der Zusammenhang zwischen der Spaltweite s_{r5} und der mittleren Partikelgröße des Produktes $x_{P,50}$ aufgestellt. Werden nun die gemessenen $x_{P,50}$ -Werte über der Spaltweite s_{r5} aufgetragen, ergibt sich gemäß Abbildung 53 kein Zusammenhang. Die Punkte liegen weit gestreut im Diagramm. Die Ursache dafür ist, dass der $x_{P,50}$ -Wert nicht nur von der Spaltweite beeinflusst wird, sondern auch von der Partikelgrößenverteilung der Aufgabefraktion bzw. einer Mischung.

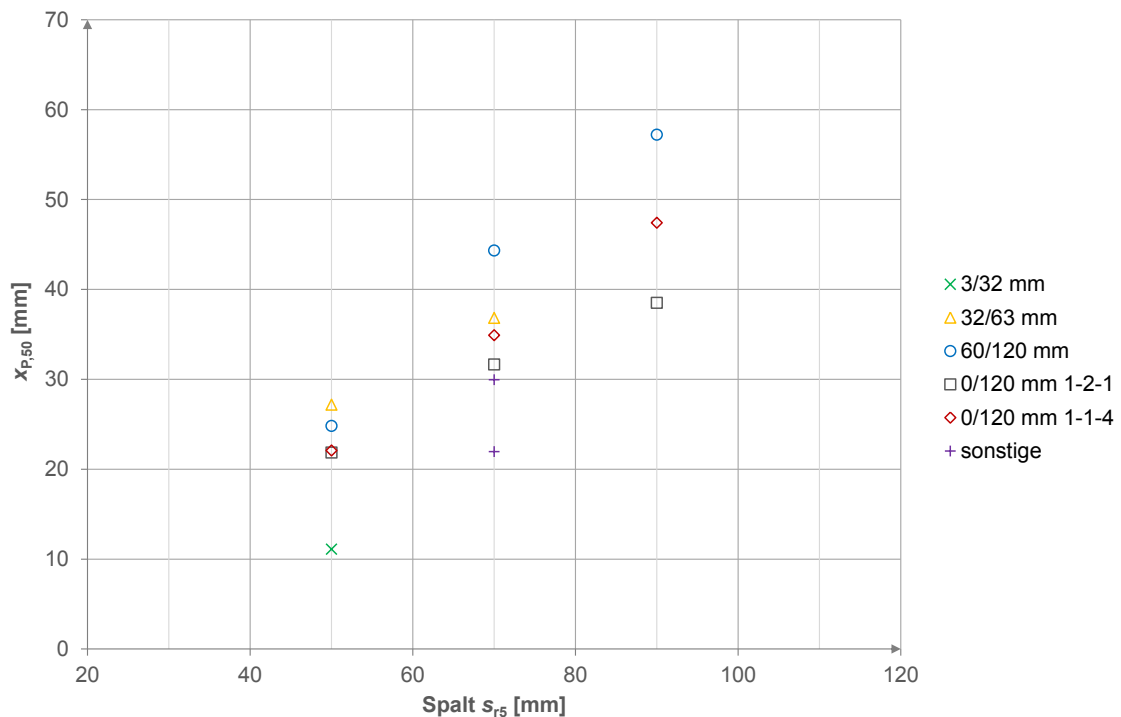


Abbildung 53: Mittlere Partikelgröße des Produktes $x_{P,50}$ in Abhängigkeit des Walzenspaltes s_{r5} für Kalkstein für verschiedene Aufgabefraktionen/Mischungen, „sonstige“ (Legende) entspricht anderen Mischungen 2-1-1 und 1-1-2

Daher wird im folgenden Schritt ein erweiterter Ansatz gewählt, siehe dazu Abbildung 54. Unter der Annahme, dass vom Aufgabegut nur der Anteil größer einer bestimmten Spaltweite gebrochen wird und der Feinanteil den Spalt ungebrochen passiert, wird das Aufgabegut rechnerisch in einen Feinanteil A_F und einen Grobanteil A_G zerlegt. Die Trennsplattweite wird hier, in Anlehnung an das WHITEN-Modell (siehe Kapitel 2.3.3), der Spaltweite s_{r2} gleichgesetzt, siehe dazu Abbildung 55 und Tabelle 23 (S. 77). Anschließend wird der Feinanteil der Aufgabe A_F von der experimentell ermittelten Produktpartikelgrößenverteilung P_{exp} subtrahiert und es

ergibt sich das Produkt mit der hier verwendeten Bezeichnung „ P_{exp}^* “, welches nun unabhängig vom Feinanteil des Aufgabematerials ist. Aus der Partikelgrößenverteilung von diesem Produkt P_{exp}^* werden nun die mittleren Partikelgrößen $x_{P^*,50}$ ermittelt und mit der Spaltweite s_{r5} korreliert. Weiterhin werden die Partikelgrößenverteilungen der Produkte P_{exp}^* einer Kurvenanpassung der Swebrec-Funktion unterzogen, um den Kurvencharakteristikfaktor b^* zu ermitteln. Danach ist es möglich, unter Kenntnis von $x_{P^*,50}$, $x_{P,\text{max}}$ und b^* die Produktpartikelgrößenverteilung des Produktes P_{mod}^* mittels der Swebrec-Funktion abhängig von Spaltweite und unabhängig vom Feinanteil der Aufgabeverteilung zu prognostizieren. Anschließend wird zum prognostizierten Produkt P_{mod}^* der Feinanteil A_F der Aufgabe hinzuaddiert und es ergibt sich abschließend die Modell-Produktpartikelgrößenverteilung P_{mod} .

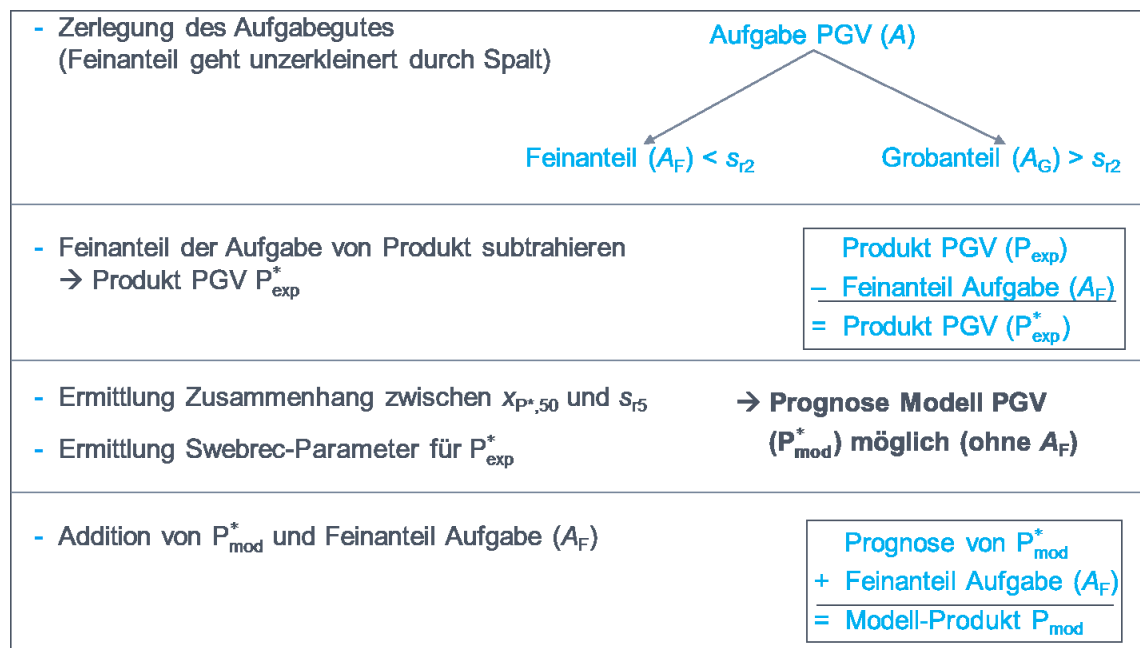


Abbildung 54: Schema zum erweiterten Ansatz zur Prognose der Partikelgrößenverteilung des Produktes

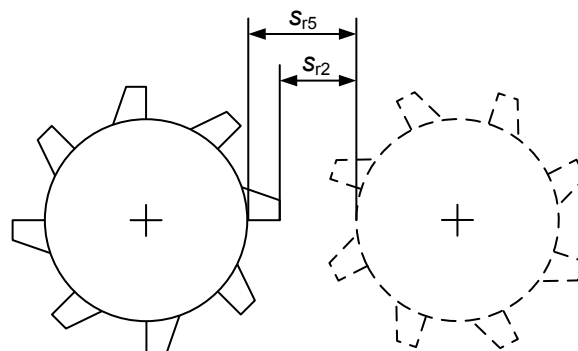


Abbildung 55: Schematische Abbildung zur Definition unterschiedlicher Spaltweiten

Tabelle 23: Nennspaltweite s_{r5} und dazugehörige Trennspaltweite s_{r2}

Nennspalt s_{r5} [mm]	Trennspalt s_{r2} [mm]
50	15
70	35
90	55

In der Abbildung 56 ist die mittlere Partikelgröße $x_{P^*,50}$ vom Produkt P^*_{exp} in Abhängigkeit des Walzenspaltes s_{r5} für Kalkstein unterschiedlicher Aufgabefraktionen bzw. Mischungen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich für den erweiterten Modellansatz im untersuchten Bereich von 50 mm bis 90 mm Spaltweite eine nahezu lineare Korrelation für alle Punkte zwischen den beiden Größen ergibt, die mit Gleichung (5.2) beschrieben werden kann. Das Bestimmtheitsmaß der Ausgleichsgeraden beträgt $R^2 = 0,96$.

$$x_{P^*,50} = 0,91 \cdot s_{r5} - 20,87 \quad \text{für } 50 \text{ mm} \leq s_{r5} \leq 90 \text{ mm} \quad (5.2)$$

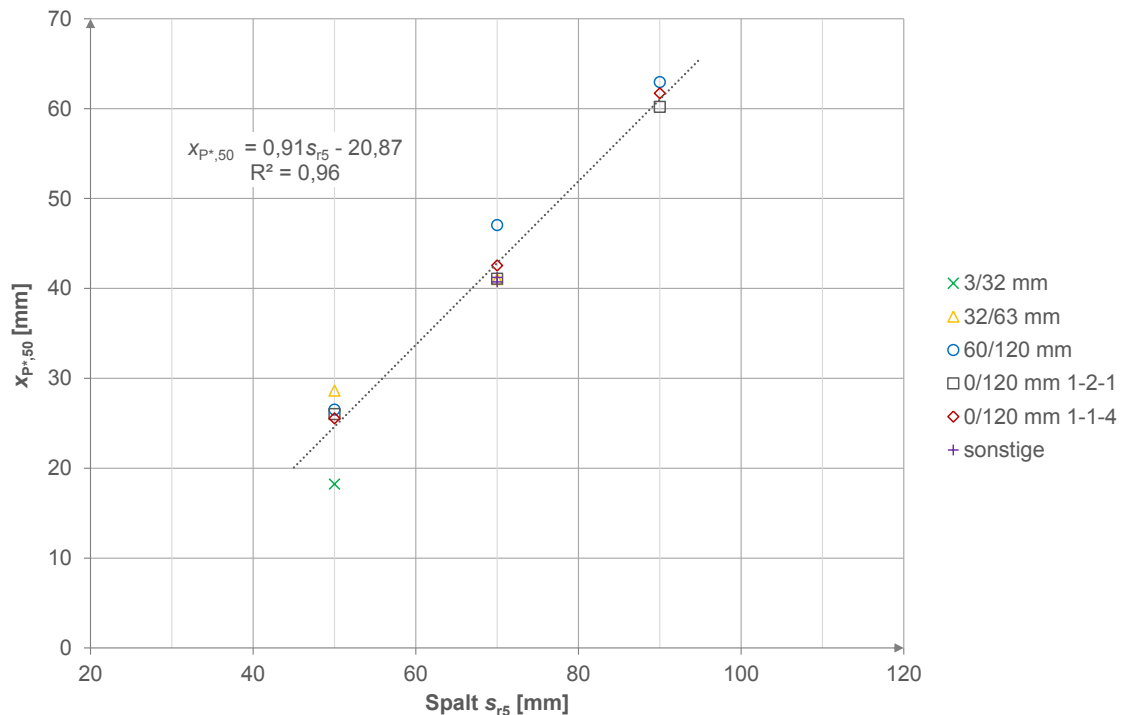


Abbildung 56: Mittlere Partikelgröße $x_{P^*,50}$ des Produktes P^*_{exp} in Abhängigkeit des Walzenspaltes s_{r5} für Kalkstein für verschiedene Aufgabefraktionen/Mischungen, „sonstige“ (Legende) entspricht anderen Mischungen 2-1-1 und 1-1-2

Um das Produkt P^*_{mod} mittels der Swebrec-Funktion prognostizieren zu können, ist neben dem Parameter $x_{P^*,50}$ auch der Kurvencharakteristikfaktor b^* notwendig. Daher wird dieser im nächsten Schritt ebenfalls durch die Kurvenanpassung der Partikelgrößenverteilungen der Produkte P^*_{exp} ermittelt. Diese Kurvenanpassung ergibt einen Kurvencharakteristikfaktor $b^* = 2,43 \pm 0,23$ bei einem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,983 \pm 0,015$. Der b^* -Wert liegt diesmal höher als der zuvor ermittelte b -Wert für die experimentell hergestellten Produkte. Dies ist auch

nachvollziehbar, da beim Produkt P_{exp}^* der Feinanteil der Aufgabe abgezogen wurde und damit das Produkt P_{exp}^* notwendigerweise steiler verteilt ist.

5.1.3 Prüfung des Modellansatzes

Nun soll das Modell auf seine Leistungsfähigkeit im Hinblick auf die Prognose der Produktpartikelgrößenverteilungen der Versuche untersucht werden. Zunächst wird die Prüfung für Kalkstein durchgeführt, da für dieses Material die größte Datenbasis vorhanden ist. Nach der Berechnung werden die prognostizierten mit den experimentell ermittelten Partikelgrößenverteilungen für eine Walzenumfangsgeschwindigkeit von 4 m/s verglichen.

Zur Prognose der Produktpartikelgrößenverteilungen wird folgendermaßen vorgegangen:

- Berechnung von $x_{P^*,\text{max}} = 1,24 \cdot s_{r5}$
- Berechnung von $x_{P^*,50} = 0,91 \cdot s_{r5} - 20,87$
- Berechnung der Produktpartikelgrößenverteilung von P_{mod}^* mittels der Swebrec-Funktion mit den Parametern aus a) und b) und $b^* = 2,43$
- Addition des Feinanteils der Aufgabe A_F zur Verteilung von P_{mod}^*

Die Vorgehensweise a) bis d) wird für alle Versuchspunkte angewendet. In der Abbildung 57 ist beispielhaft der Vergleich zwischen einer experimentell ermittelten Produktpartikelgrößenverteilung und der prognostizierten Verteilung dargestellt. Die Versuchsparameter sind der Abbildung 57 zu entnehmen. Das Diagramm zeigt, dass die prognostizierte Modellkurve in einem engen Bereich mit der experimentell ermittelten Kurve übereinstimmt. Die Abweichungen der Verteilungssumme sind kleiner als 5 %.

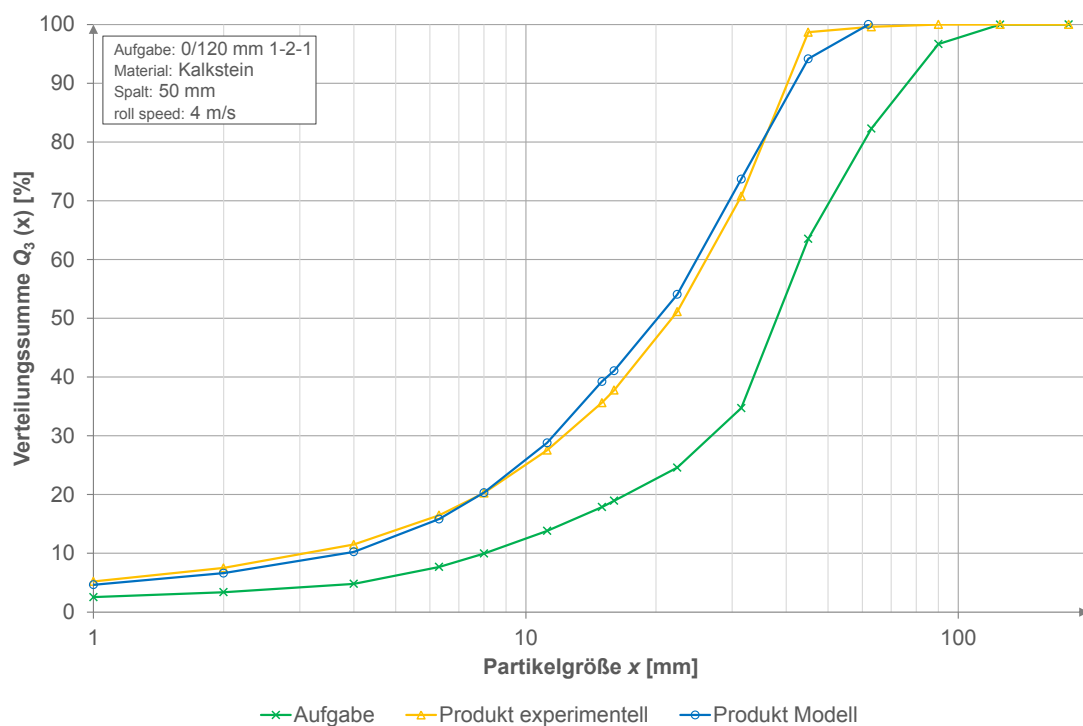


Abbildung 57: Vergleich der Produktpartikelgrößenverteilungen, experimentell ermittelt und mit Modell prognostiziert

Um die Güte des Modells nicht nur anhand der Kurven der Produktpartikelgrößenverteilungen zu beurteilen, wird ein Vergleich von drei Kennwerten der Partikelgrößenverteilung $x_{P,80}$, $x_{P,50}$ und $x_{P,25}$ gezogen. Dazu sind Abbildung 58 bis Abbildung 60 zu betrachten. Hier ist jeweils der mit dem Modell errechnete Wert über dem experimentell ermittelten Wert aufgetragen. Wenn ein Datenpunkt auf der diagonalen Linie im Diagramm liegt, dann ist der Modellwert mit dem Experimentalwert deckungsgleich. Das bedeutet, je näher ein Punkt an den Geraden liegt, desto geringer ist die Abweichung. Die beiden gestrichelten Linien in den Diagrammen stellen jeweils die positive und negative 10 %-ige Abweichung vom experimentellen Wert dar.

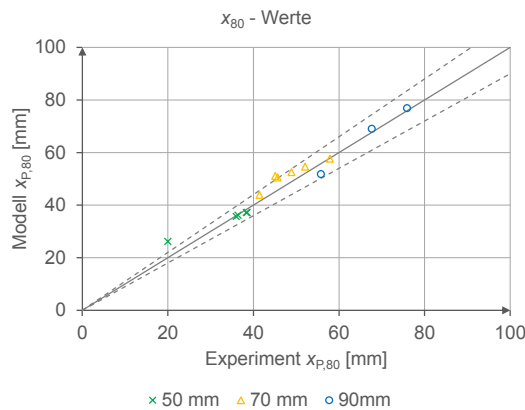


Abbildung 58: Vergleich der $x_{P,80}$ -Werte von Modell und Experiment für Kalkstein

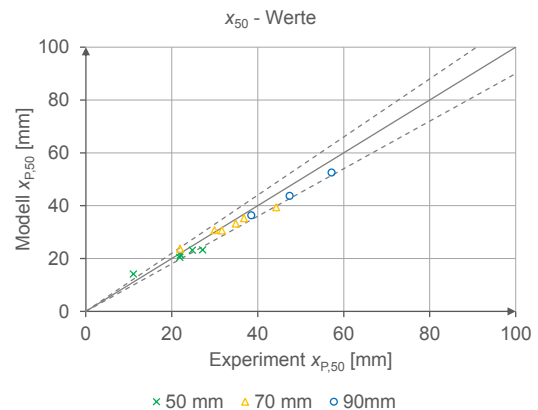


Abbildung 59: Vergleich der $x_{P,50}$ -Werte von Modell und Experiment für Kalkstein

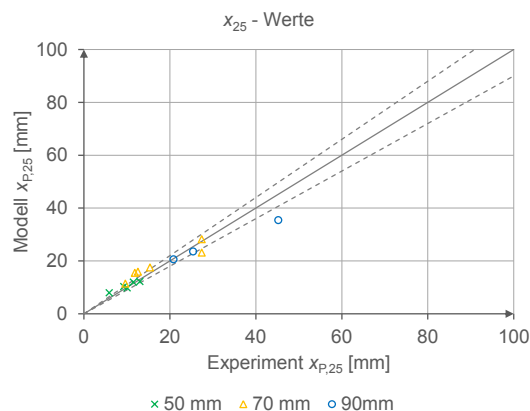


Abbildung 60: Vergleich der $x_{P,25}$ -Werte von Modell und Experiment für Kalkstein

Die drei Diagramme zeigen, dass der Großteil der Datenpunkte dicht an den Diagonalen liegt. Für den $x_{P,50}$ -Wert errechnet das Modell tendenziell zu geringe und für den $x_{P,80}$ -Wert tendenziell zu hohe Werte. Die betragsmäßigen Differenzen von Experimental- und Modellwert betragen im Mittel für den $x_{P,25}$, $x_{P,50}$ und $x_{P,80}$ -Wert ca. 2,3 mm, 2,4 mm und 2,5 mm. Sie liegen damit nah beieinander. Wird die absolute Abweichung auf die experimentell ermittelten Werte bezogen, ergibt sich die relative Abweichung. Der Großteil der Datenpunkte liegt innerhalb der vorgegebenen Grenzen ($\pm 10\%$). Im Mittel ergibt sich die größte Abweichung von ca. 14 % für den $x_{P,25}$ -Wert, da hier im Vergleich zu den anderen beiden Kennwerten die annähernd gleiche absolute Abweichung auf einen viel kleineren Bezugswert bezogen wird. Für den $x_{P,50}$ - und $x_{P,80}$ -Wert betragen die Abweichungen ca. 8 % bzw. 7 % im Mittel. Dennoch wird dem Modell

eine hohe Modellgüte zugesprochen. Die insgesamt geringe Abweichung bestätigt auch die Annahme, dass die Trennspaltweite der Spaltweite s_{r2} gleichgesetzt werden kann.

Abschließend kann festgestellt werden, dass mit diesem Modell die Partikelgrößenverteilung des Produktes für Kalkstein im untersuchten Bereich sehr gut prognostiziert werden kann. Es ist jedoch in weiterführenden Untersuchungen zu prüfen, inwieweit das Modell zur Extrapolation von größeren Partikelgrößen, vor allem des Wertes $x_{P^*,50}$, verwendet werden kann. Die Übertragbarkeit des b -Wertes wird dagegen als gegeben eingeschätzt, auch da die in dieser Arbeit ermittelten Werte mit denen der Literatur weitestgehend übereinstimmen.

5.1.4 Ausblick für andere Gesteine

Obwohl die Datenbasis für Andesit und Diabas im Vergleich zum Kalkstein gering ist, soll der erarbeitete Modellansatz trotzdem auch für diese Gesteine geprüft werden. Die Vorgehensweise ist identisch mit dem Vorgehen für Kalkstein im vorigen Kapitel.

Die Abbildung 61 zeigt die Abhängigkeit zwischen $x_{P^*,50}$ und der Spaltweite s_{r5} für Andesit und Diabas. Hier ergibt sich ebenfalls, wie bei Kalkstein, eine lineare Korrelation der Gleichung (5.3) mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,996$.

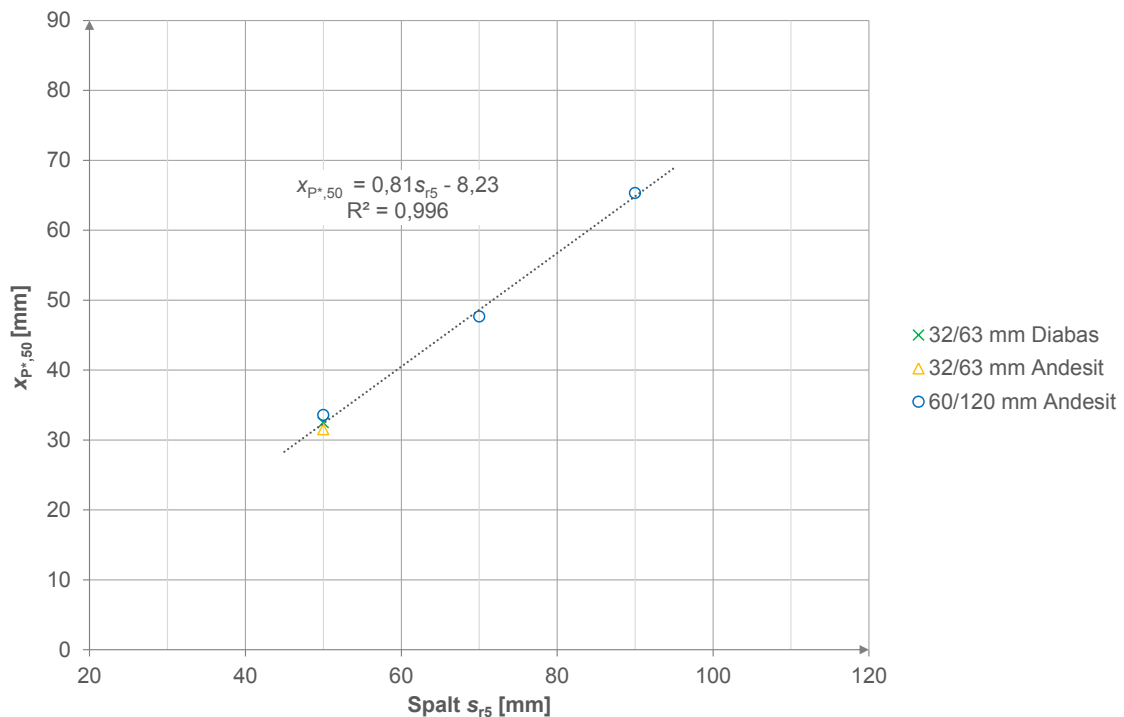


Abbildung 61: Mittlere Partikelgröße $x_{P^*,50}$ des Produktes P^*_{exp} in Abhängigkeit des Walzenspaltes s_{r5} für Andesit und Diabas für verschiedene Aufgabefractionen

$$x_{P^*,50} = 0,81 \cdot s_{r5} - 8,23 \quad \text{für } 50 \text{ mm} \leq s_{r5} \leq 90 \text{ mm} \quad (5.3)$$

Die Kurvenanpassung der Verteilungen der Produkte P^*_{exp} von Andesit und Diabas ergibt einen Kurvencharakteristikfaktor von $b^* = 3,25 \pm 0,61$ bei einem Bestimmtheitsmaß von

$R^2 = 0,997 \pm 0,001$. Zur Ermittlung dieser Daten wurde Andesit und Diabas zusammengefasst betrachtet.

Auch hier wird der Vergleich der charakteristischen Kennwerte $x_{P,80}$, $x_{P,50}$ und $x_{P,25}$ für die mit dem Modell ermittelten Werte und den experimentellen Werten durchgeführt, siehe dazu Abbildung 62 bis Abbildung 64. Es zeigt sich im Vergleich zu Kalkstein eine noch bessere Übereinstimmung der prognostizierten und der experimentell ermittelten Werte. Die Datenpunkte liegen dichter an den Diagonalen in den Diagrammen. Im Mittel beträgt die absolute Abweichung der $x_{P,25}$, $x_{P,50}$ und $x_{P,80}$ -Wert je ca. 1,0 mm. Die relative Abweichung ist im Mittel mit Werten von 2 % für $x_{P,80}$ und $x_{P,50}$ bzw. 4 % für $x_{P,25}$ ebenfalls klein. Es gilt jedoch zu beachten, dass das Parameterfeld für die Versuche mit Andesit und Diabas nicht so breit ist wie bei Kalkstein.

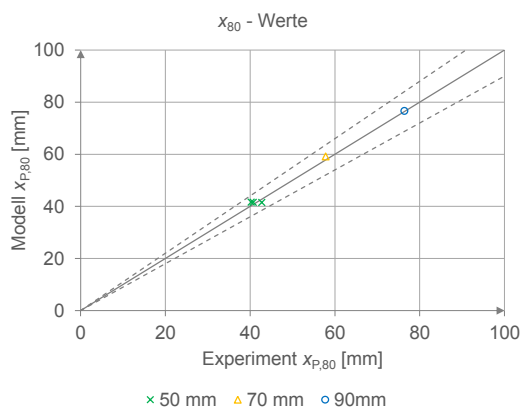


Abbildung 62: Vergleich der $x_{P,80}$ -Werte von Modell und Experiment für Andesit/Diabas

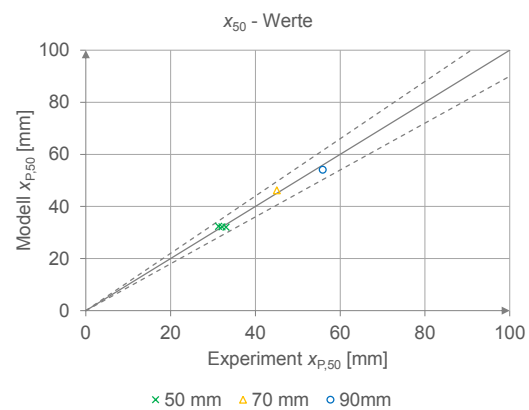


Abbildung 63: Vergleich der $x_{P,50}$ -Werte von Modell und Experiment für Andesit/Diabas

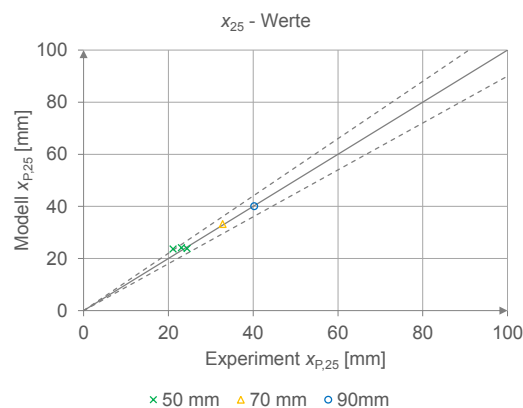


Abbildung 64: Vergleich der $x_{P,25}$ -Werte von Modell und Experiment für Andesit/Diabas

5.2 Massedurchsatz

Gegenwärtig wird in der Praxis zur Auslegung von Profilwalzenbrechern häufig der Modellansatz nach Gleichung (2.26) (siehe Kapitel 2.3.2) verwendet. Bei diesem Modell besteht die größte Unsicherheit bei der Wahl des richtigen Wertes für den Füllungsgrad φ_F . Dieser ist u. a. maßgeblich von der Partikelgrößenverteilung des Aufgabegutes abhängig, wobei für Profil-

walzenbrecher nur wenige Zusammenhänge bekannt sind. Noch schwieriger wird die Prognose des Durchsatzes, wenn übergroße Partikel aufgegeben werden, wie in der Praxis üblich. Diese berücksichtigt das o. g. Modell nicht. Aus diesen Gründen wird in der Praxis von Anlagenherstellern häufig auf Erfahrungswerte zurückgegriffen. Ziel ist es also in dieser Arbeit, einen Modellansatz zu entwickeln, bei dem der Massedurchsatz von Aufgabematerial unterschiedlichster Partikelgrößenverteilung, auch bei Aufgabe von übergroßen Partikeln, sicherer prognostiziert werden kann.

5.2.1 Aufstellen eines Modellansatzes

Mit den in dieser Arbeit durchgeführten Versuchen wurden jeweils die Grenzdurchsätze vor allem von verschiedenen großen Einzelfractionen ermittelt. Da in der Praxis jedoch keine eng verteilten Aufgabematerialien sondern überwiegend Mischungen vorliegen, wird ein Modellansatz zur Berechnung des Grenzdurchsatzes von beliebigen Mischungen aufgestellt und auf seine Eignung geprüft. Dies wird aufgrund der ausreichend großen Datenbasis nur für den untersuchten Kalkstein bei 4 m/s durchgeführt.

Für den Modellansatz wird ein Bilanzansatz mit folgender These aufgestellt: Eine Materialmischung der Masse m_G benötigt zum Durchtritt durch den Walzenspalt dieselbe Zeit t_G wie alle Einzelfractionen der Massen m_i , in welche diese Mischung ggfs. zuvor beliebig aufgeteilt wurde, nacheinander benötigen würden. Bedingung dafür ist, dass die Einzelfractionen den Walzenspalt jeweils mit Maximaldurchsatz passieren, siehe Gleichung (5.4).

$$\dot{m} = \frac{m_G}{t_G} = \frac{\sum m_i}{\sum t_i} = \frac{m_G}{\sum t_i} \quad \text{mit} \quad m_G = \sum m_i \quad (5.4)$$

Der Massedurchsatz \dot{m}_i einer Fraktion berechnet sich aus dem Quotient von Fraktionsmasse m_i und Zeit t_i , in der diese Masse durchgesetzt wird, siehe Gleichung (5.5).

$$\dot{m}_i = \frac{m_i}{t_i} \quad (5.5)$$

Durch Umstellen und Einsetzen von (5.5) in (5.4) folgt:

$$\dot{m} = \frac{m_G}{\sum \frac{m_i}{\dot{m}_i}} \quad (5.6)$$

Der Masseanteil einer Fraktion μ_i ergibt sich nach Formel (5.7).

$$\mu_i = \frac{m_i}{m_G} \quad (5.7)$$

Durch Umstellen von (5.7) und Einsetzen in (5.6) ergibt sich der Modellansatz nach Gleichung (5.8).

$$\dot{m} = \frac{m_G}{\sum \frac{\mu_i \cdot m_G}{\dot{m}_i}} = \frac{m_G}{m_G \cdot \sum \frac{\mu_i}{\dot{m}_i}} = \frac{1}{\sum \frac{\mu_i}{\dot{m}_i}} \quad (5.8)$$

Aus der Gleichung (5.8) folgt, dass mit diesem Modellansatz unter Kenntnis der Fraktionsmassedurchsätze \dot{m}_i und der Masseanteile μ_i der Fraktionen der Massedurchsatz einer beliebigen Mischung berechnet werden kann.

Das aufgestellte Modell wird nun mit den experimentell ermittelten Werten verglichen. Die Tabelle 24 zeigt zunächst eine Beispielrechnung für eine 1-2-1 Mischung bei 50 mm Spaltweite. Die letzte Spalte der Tabelle entspricht dem Term $\frac{\mu_i}{\dot{m}_i}$ aus Formel (5.8).

Tabelle 24: Beispiel zur Berechnung des Massedurchsatzes einer Mischung 1-2-1 ohne Überpartikel bei 50 mm Spaltweite und 4 m/s Umfangsgeschwindigkeit; *experimentell ermittelt

Fraktion [mm]	Durchsatz* [t/h]	Spezifische Durchtrittszeit [s/t]	Masseanteil [%]	Gewichtete Durchtrittszeit [s/t]
3/32	373	9,7	25	2,4
32/63	240	15,0	50	7,5
60/120	107	33,6	25	8,4
Summe				18,3 s/t
Durchsatz bilanziert				197 t/h
Durchsatz experimentell				215 t/h

Für das Beispiel der 1-2-1 Mischung ohne Überpartikel ergibt sich für das Modell in der Gesamtbilanz ein Massedurchsatz von 197 t/h. Damit liegt der errechnete Wert ca. 8 % unter dem experimentell ermittelten Wert.

Das Modell soll nicht nur für Materialmischungen aus sofort einziehbaren Fraktionen angewendet werden können, sondern auch für Mischungen mit Anteilen an übergroßen Partikeln. Dazu ist jedoch die Kenntnis der Grenzmassedurchsätze eben dieser Überpartikel notwendig. Die Werte dafür werden aus den in den Versuchen mit Überpartikeln ermittelten Verweilzeiten (siehe Kapitel 3.4.2 und 4.1) wie folgt abgeleitet. Aus dem Quotienten von gemittelter Masse und der Verweilzeit t_v eines Überpartikels einer Überpartikelfraktion lässt sich der Durchsatz für ein Überpartikel berechnen. Hierbei wird zunächst mit den experimentell ermittelten Werten der Verweilzeit gemäß dem Diagramm in Abbildung 33 in Kapitel 4.1 gerechnet. Anschließend wird der Durchsatzwert auf einen vollgefüllten Brechraum dieser Überpartikelfraktion umgerechnet, in dem er mit der theoretisch möglichen maximalen Anzahl an Steinen im Brechraum multipliziert wird. Diese Anzahl berechnet sich aus dem Quotienten von Walzenlänge L_W zu mittlerer Fraktionspartikelgröße x_m . Die damit ermittelten Werte sind in der folgenden Tabelle 25 zusammengefasst.

Tabelle 25: Berechnete Werte für den maximalen Durchsatz der Überpartikelfraktion (Brechraum vollgefüllt) für 4 m/s Walzenumfangsgeschwindigkeit, Werte der Verweilzeit experimentell ermittelt

Spalt [mm]	Fraktion [mm]	x_m [mm]	Verweilzeit pro Überpartikel [s]	max. Anzahl an Überpartikeln im Brechraum [-]	Durchsatz (Brechraum voll) [t/h]
50	120/160	140	10,6	3,2	5,1
	160/200	180	27,4	2,5	2,7
	200/250	225	45,5	2,0	2,6
70	120/160	140	5,1	3,2	10,7
	160/200	180	11,6	2,5	6,5
	200/250	225	23,9	2,0	4,8
90	120/160	140	2,7	3,2	20,1
	160/200	180	6,0	2,5	12,5
	200/250	225	11,7	2,0	9,9

Die nachstehende Tabelle 26 zeigt ein Berechnungsbeispiel einer Mischung mit einem Überpartikelanteil der Fraktion 120/160 mm. Der bilanzierte Modelldurchsatz liegt bei diesem Beispiel bei 176 t/h ca. 5 % unter dem experimentell ermittelten Wert von 185 t/h. Obwohl der Masseanteil der Überpartikel nur 0,8 % beträgt, liegt der Durchsatz hier 23 % unter dem Durchsatz von 240 t/h der Fraktion 32/63 mm ohne Überpartikel. Dies liegt an der überdurchschnittlich langen spezifischen Durchtrittszeit der Überpartikel von 703 s/t im Vergleich zur sofort eingezogenen Fraktion.

Tabelle 26: Beispiel zur Berechnung des Massedurchsatzes einer Mischung 0-1-0 mit Überpartikeln der Fraktion 120/160 mm bei 50 mm Spaltweite und 4 m/s Umfangsgeschwindigkeit; *experimentell ermittelt

Fraktion [mm]	Durchsatz* [t/h]	Spezifische Durchtrittszeit [s/t]	Masseanteil [%]	Gewichtete Durchtrittszeit [s/t]
3/32	373	9,7	0	0
32/63	240	15,0	99,2	14,9
60/120	107	33,6	0	0
120/160	5	703,0	0,8	5,6
Summe				20,5 s/t
Durchsatz bilanziert				176 t/h
Durchsatz experimentell				185 t/h

Um den Modellansatz letztlich auf seine Eignung zu prüfen, werden die Modellwerte für alle untersuchten Materialmischungen mit und ohne Überpartikel nach Formel (5.8) errechnet. Die zur Berechnung von Mischungen benötigten Masseanteile der Überpartikel sind der Tabelle 31 im Anhang B zu entnehmen.

Die Abbildung 65 zeigt schließlich den Vergleich der Modellwerte und der experimentell ermittelten Massedurchsatzwerte. Je näher die Datenpunkte an der Diagonalen liegen, desto besser ist die Übereinstimmung von Modell und den experimentell ermittelten Werten. Die beiden gestrichelten Linien stellen die positive bzw. negative Abweichung in Höhe von 10 % bezüglich der experimentell ermittelten Werte dar. Generell ist aus dem Diagramm zu erkennen, dass die Datenpunkte im Allgemeinen unter der Diagonalen liegen und damit die Modellwerte kleiner als die experimentell ermittelten Werte sind. Die Versuche bei 90 mm Spaltweite zeigen die geringste Abweichung, wohingegen die Versuche bei einer Spaltweite von 70 mm stärker abweichen. Die Abweichung ist damit zu erklären, dass sogenanntes Rieselgut im Modell nicht berücksichtigt wird. Beim Modellansatz gilt die Annahme, dass die Fraktionen nacheinander durchgesetzt werden. Bei einer realen Mischung kann sich jedoch feines Material in die Lücken einer Mischung mit grober Partikelgrößenverteilung setzen, sodass am Ende der experimentell ermittelte Durchsatz größer ist, als vom Modell prognostiziert. Die Abweichung beträgt im Mittel der Versuchspunkte ca. 10 %. Dennoch zeigt der Modellansatz eine hinreichend gute Genauigkeit und wird als geeignet eingestuft. Im folgenden Kapitel soll der Modellansatz schließlich weiter verallgemeinert werden.

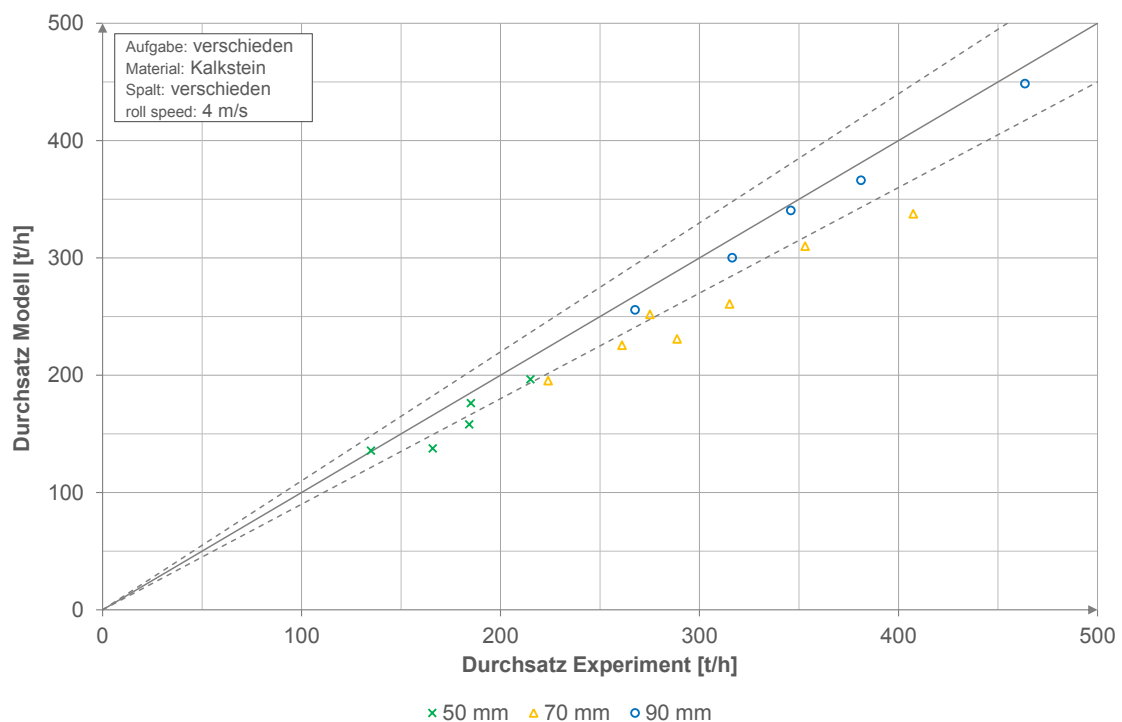


Abbildung 65: Vergleich der experimentell ermittelten Massedurchsätze mit den Modellwerten, für Kalkstein bei 4 m/s Umfangsgeschwindigkeit

5.2.2 Verallgemeinerung des Modells

Wie im vorigen Abschnitt 5.2.1 gezeigt wird, liefert das Modell sinnvolle Werte zur Prognose des Massedurchsatzes einer Mischung aus den bilanzierten Durchsätzen der Einzelfraktionen. Daher soll nun auf Basis der Modellgleichung (5.8) eine weitere Verallgemeinerung erfolgen, um das Modell nicht nur für die genauen experimentell ermittelten Werte anzuwenden. Am

Ende erfolgt erneut ein Vergleich der Werte des verallgemeinerten Modells mit den experimentellen Werten für alle untersuchten Umfangsgeschwindigkeiten.

Die Modellgleichung (5.8) zur Berechnung des Massedurchsatzes einer Mischung hängt nur vom Masseanteil μ_i der Einzelfractionen und deren Massedurchsatz \dot{m}_i ab. Für die weitere Modellierung wird angenommen, dass der Masseanteil der Einzelfractionen einer Aufgabematerialmischung bekannt ist. Folglich ist nur noch der Massedurchsatz der Einzelfractionen zu prognostizieren, um den Durchsatz einer Mischung zu errechnen. Dafür wird wiederum die Gleichung (5.9) verwendet. Für die Spaltweite s wird die Äquivalenzspaltweite $s_{\text{äq}}$ eingesetzt. Die Materialgeschwindigkeit entspricht der Walzenumfangsgeschwindigkeit $v_{U,\text{äq}}$ am Äquivalenzradius. Für die Schüttdichte ρ_{Sch} wird zur Verallgemeinerung der Mittelwert der Schüttdichte der drei Einzelpartikelfractionen $\bar{\rho}_{\text{Sch}} = 1,47 \text{ t/m}^3$ eingesetzt.

$$\dot{m}_i = L_W \cdot s_{\text{äq}} \cdot v_{U,\text{äq}} \cdot \varphi_{F1,i} \cdot \bar{\rho}_{\text{Sch}} \quad (5.9)$$

Durch Einsetzen von Formel (5.9) in (5.8) ergibt sich schließlich Formel (5.10) zur Berechnung des Massedurchsatzes einer Mischung.

$$\dot{m} = \frac{L_W \cdot s_{\text{äq}} \cdot v_{U,\text{äq}} \cdot \bar{\rho}_{\text{Sch}}}{\sum \frac{\mu_i}{\varphi_{F1,i}}} \quad (5.10)$$

In der Gleichung (5.10) sind nun bis auf den Füllungsgrad $\varphi_{F1,i}$ der jeweiligen Fraktion alle Parameter bekannt. Im Rahmen der Verallgemeinerung wird für den Füllungsgrad einer Fraktion der Mittelwert aller drei Spaltweiten gebildet, da er laut Auswertung im Kapitel 4.3.2 weitestgehend unabhängig von der Spaltweite ist. Für die Einzelfractionen wird der Füllungsgrad aus den experimentell ermittelten Durchsatzwerten errechnet. Zur Ermittlung der Füllungsgrade der Überpartikelfraktion wird zunächst deren Durchsatz aus den errechneten Verweilzeiten nach Formel (4.1) aus Kapitel 4.1 und anschließend wiederum der gemittelte Füllungsgrad aller Spaltweiten berechnet. Dies wird für alle Walzenumfangsgeschwindigkeiten durchgeführt. Die Abbildung 66 zeigt als Ergebnis schließlich die Abhängigkeit des über der Spaltweite gemittelten Füllungsgrades φ_{F1} von der Aufgabepartikelgröße $x_{A,95}$ für unterschiedliche Walzenumfangsgeschwindigkeiten. Für die Umfangsgeschwindigkeiten 2 m/s, 6 m/s und 8 m/s sind keine Versuche mit Überpartikelfraktion durchgeführt worden, sodass im Diagramm für diese Fraktionen nur Datenpunkte für 4 m/s dargestellt sind. Aus diesem Diagramm können schlussendlich die zur Berechnung der Massedurchsätze noch benötigten Füllungsgrade ermittelt werden.

Zur Überprüfung des Modells werden nun mit den aus dem Diagramm in Abbildung 66 ermittelten Füllungsgraden die Modellwerte nach Gleichung (5.10) für alle durchgeführten Versuchspunkte von Kalkstein errechnet. Die Abbildung 67 zeigt schließlich den Vergleich von Modell- und Experimentalwerten. Im Gegensatz zu den Datenpunkten aus Abbildung 65 liegen die Punkte hier gestreut um die Diagonale im Diagramm. Das bedeutet, dass mit der Modellgleichung sowohl zu niedrige als auch zu hohe Durchsätze prognostiziert werden. Der Großteil

der Datenpunkte liegt innerhalb der 10 %-igen Abweichung, wobei die mittlere Abweichung aller Datenpunkte 7,4 % beträgt. Im Allgemeinen zeigen die Modellwerte der Einzelfractionen mit einer mittleren Abweichung von 5,9 % geringere Abweichungen als die der Mischungen mit 10,4 %. Dennoch belegen die Ergebnisse eine gute Vorhersagegenauigkeit des zu erwartenden Durchsatzes. Das Modell des balanzierten Massedurchsatzes ist jedoch für größere Profilwalzenbrecher zukünftig noch auf seine Übertragbarkeit und Gültigkeit zu überprüfen.

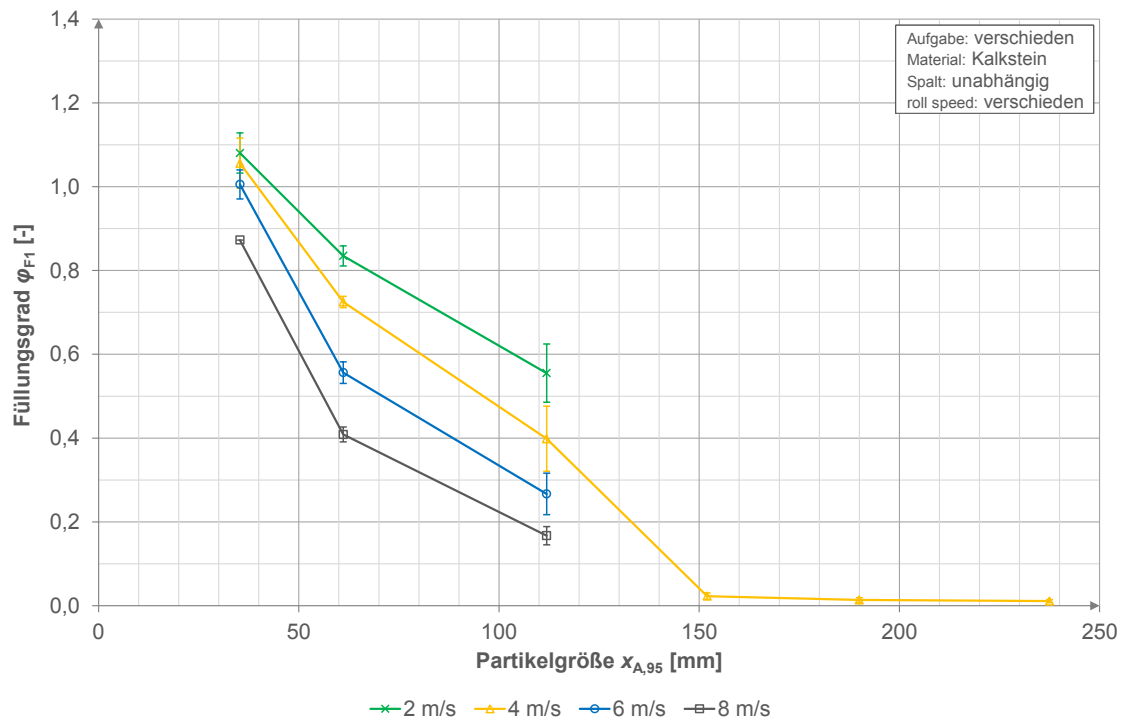


Abbildung 66: Mittlerer Füllungsgrad ϕ_{F1} in Abhängigkeit von der Aufgabepartikelgröße $x_{A,95}$ für Kalkstein für verschiedene Walzenumfangsgeschwindigkeiten

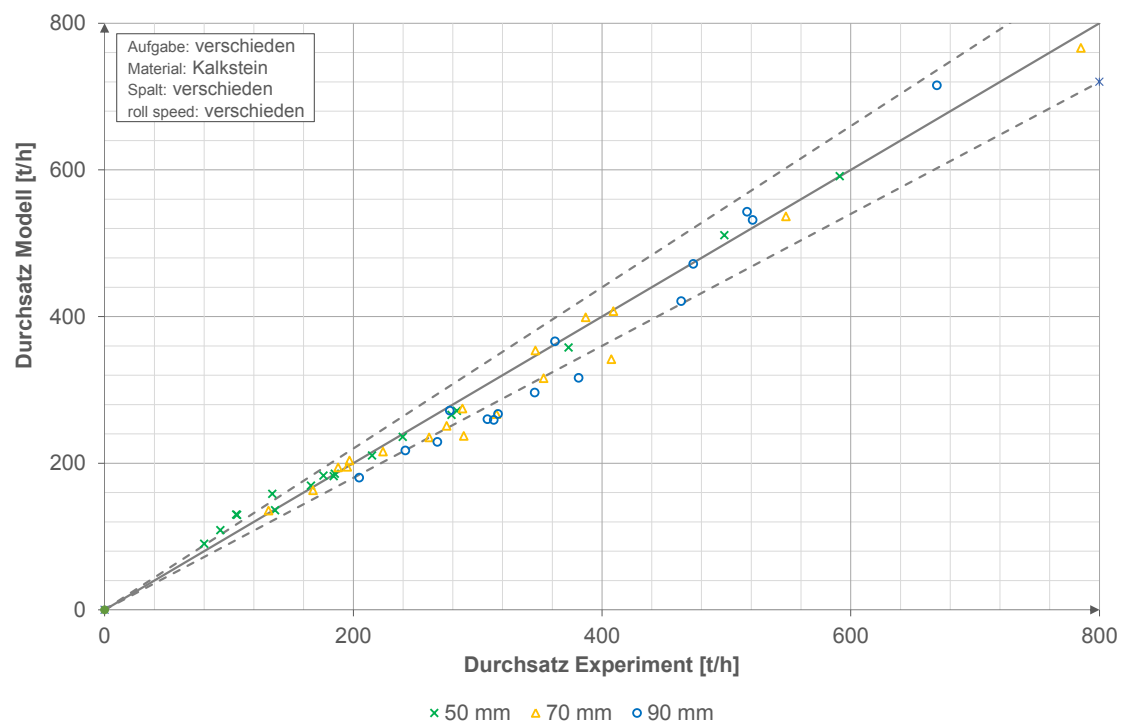


Abbildung 67: Vergleich der experimentell ermittelten Massedurchsätze mit den Modellwerten

6 Zusammenfassung

Die Zerkleinerung mit Hilfe von Walzen ist ein altbewährtes Prinzip, wobei der in dieser Arbeit verwendete profilierte Doppelwalzenbrecher für die industrielle Anwendung am häufigsten eingesetzt wird. Profilwalzenbrecher gewinnen heutzutage u. a. aufgrund ihres großen möglichen Massedurchsatzes bei vergleichsweise geringer Bauhöhe wieder an Bedeutung und werden wieder häufiger in der Primärbrechstufe, beispielsweise in der Ölsandaufbereitung, eingesetzt.

Trotz der steigenden Bedeutung werden zur Auslegung von Doppelwalzenbrechern oft einfache Modelle verwendet, wobei wichtige Einflussfaktoren z. T. unberücksichtigt bleiben. Im Hinblick auf den Massestrom bleiben übergroße Partikel, welche in der Praxis häufig von Anlagenbetreibern aufgegeben werden, in den Modellen unberücksichtigt. Diese haben jedoch einen großen Einfluss auf die Durchsatzleistung, da bereits geringe Masseanteile an Überpartikeln den Durchsatz beträchtlich senken können. Zur Prognose der Partikelgrößenverteilung des Produktes werden bisher z. T. ältere Verteilungsfunktionen wie z. B. die RRSB-Verteilung genutzt, obwohl mit der Swebrec-Funktion eine neue, für die Prognose von Zerkleinerungsprodukten unterschiedlicher Brechertypen vielversprechende, Verteilungsfunktion entwickelt wurde. Daher besteht das Ziel dieser Arbeit in der Entwicklung von verbesserten Auslegungsmodellen für Doppelwalzenbrecher, mit denen präzisere Prognosen von Massedurchsatz und Partikelgrößenverteilung des Produktes möglich sind. Im Modell des Massedurchsatzes wird vor allem der Einfluss übergroßer, nicht sofort einziehbarer Partikel berücksichtigt. Für die Prognose der Partikelgrößenverteilung wird ein Modell auf Basis der neuen Swebrec-Verteilungsfunktion entwickelt.

Basis für die Modellbildung sind experimentelle Untersuchungen mit einem profilierten Doppelwalzenbrecher im halbindustriellen Maßstab. Das Versuchsprogramm sieht dabei die Variation verschiedener Einflussgrößen über einen weiten Wertebereich vor. Als Versuchsmaterial wird neben Andesit (150 MPa) und Diabas (180 MPa) hauptsächlich Kalkstein mit einer einaxialen Druckfestigkeit von 100 MPa verwendet. Die Walzenumfangsgeschwindigkeit wird in vier Stufen von 2 m/s bis 8 m/s und die Spaltweite in drei Stufen von 50 mm bis 90 mm variiert. Weiterhin werden verschiedene sofort einziehbare Einzelfraktionen (3/32 mm, 32/63 mm und 60/120 mm) und zusätzlich Überpartikelfraktionen (120/160 mm, 160/200 mm und 200/250 mm) sowie unterschiedliche Mischungen aus diesen Fraktionen getestet.

Die durch die experimentellen Untersuchungen gewonnen Erkenntnisse gliedern sich in dieser Zusammenfassung neben dem Einzugsverhalten nach den wichtigsten Zielgrößen für Doppelwalzenbrecher, der Partikelgrößenverteilung des Brechprodukts und dem Massedurchsatz. Anschließend werden die Ergebnisse der Modellbildung für diese Zielgrößen zusammengefasst.

Einzugsverhalten

Die Untersuchung des Einzugsverhaltens von übergroßen Einzelpartikeln erfolgt unter betriebsnahen Bedingungen. Die Einzelpartikel der unterschiedlichen Überpartikelfraktionen werden zusammen mit der Einzelfraktion 32/63 mm aufgegeben, um den Materialdruck von nachströmenden Partikeln zu berücksichtigen. Erwartungsgemäß zeigt sich im Ergebnis, dass die Verweilzeit der Überpartikel im Brechraum mit zunehmender Partikelgröße und kleinerem Spalt steigen. Beispielsweise liegt die Verweilzeit der Fraktion 200/250 mm für 90 mm Spaltweite bei ca. 12 s, bei 50 mm Spaltweite hingegen mit 46 s um das 4-fache höher. Je größer die Partikelgröße, desto größer sind auch die Unterschiede der Verweilzeiten für verschiedene Spaltweiten. Im Vergleich zu Versuchen ohne nachströmendes Material liegt die Verweilzeit mit Materialdruck ca. 50 % niedriger. Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass für die Überpartikel ein Zusammenhang zwischen der Verweilzeit und dem Verhältnis von Spaltweite zu mittlerer Partikelgröße besteht. Dieser kann mit einer Potenzfunktion mit einem hohen Bestimmtheitsmaß von 0,98 approximiert werden. Somit kann die Verweilzeit im Brechraum für Überpartikel mit nachströmendem Material im untersuchten Bereich für beliebige Spaltweiten und Partikelgrößen berechnet werden.

Partikelgrößenverteilung des Produktes

Die Versuche mit verschiedenen Walzenumfangsgeschwindigkeiten von 2 m/s bis 8 m/s zeigen, dass zwischen der Partikelgrößenverteilung des Zerkleinerungsproduktes und der Umfangsgeschwindigkeit ein Zusammenhang besteht. Abhängig vom Verhältnis der Aufgabepartikelgröße zur Spaltweite ergeben sich jedoch gegensätzliche Tendenzen. Ist das Material überwiegend kleiner als der Walzenspalt, so wird das Produkt mit zunehmender Walzenumfangsgeschwindigkeit gröber. Bei gegenüber der Spaltweite überwiegend größerem Material ergibt sich mit höherer Umfangsgeschwindigkeit ein feineres Produkt. Die Partikelgrößenverteilungen liegen im Allgemeinen dicht beieinander. Die maximalen Unterschiede bei der Durchgangssummenverteilung der Produkte liegen in Einzelfällen bei ca. 12 %. Unter Einbeziehung der Schwankungsbereiche der Produktpartikelgrößenverteilungen, liegen diese teilweise übereinander. Insgesamt lässt sich durch Variation der Walzenumfangsgeschwindigkeit die Partikelgrößenverteilung des Zerkleinerungsproduktes nur geringfügig beeinflussen. Der größte Einfluss wurde bei einem Walzenspalt von 50 mm und der Fraktion 32/63 mm festgestellt. Hier beträgt der Unterschied des x_{50} -Wertes zwischen 2 m/s und 8 m/s ca. 5 mm bzw. 17 %.

Viel größeren Einfluss hat die Spaltweite des Brechers. Bei Änderung der Spaltweite von 90 mm auf 50 mm ergibt sich bei der Aufgabefraktion 60/120 mm für Kalkstein die größte Verringerung des x_{50} -Wertes um ca. 32 mm bzw. 57 %. Weiterhin wird mit zunehmendem Zerkleinerungsverhältnis, folglich kleineren Spaltweiten, mehr Feingut produziert, sodass die Kurven der Partikelgrößenverteilungsfunktion flacher verlaufen. Das ist bei Vorbrechern häufig unerwünscht.

Der Einfluss der Partikelgrößenverteilung der Aufgabefraktion auf die Partikelgrößenverteilung des Produktes ist nach den Erkenntnissen dieser Arbeit gering, wenn der x_{50} -Wert des Aufgabematerials im gleichen Bereich oder oberhalb der Spaltweite liegt. Im Gegensatz dazu besitzt die Spaltweite einen signifikanten Einfluss. Die Partikelgrößenverteilungsfunktionen der Produkte bei 50 mm Spaltweite fallen trotz der unterschiedlichen Aufgabeverteilung der Fraktionen 32/63 mm und 60/120 mm des Kalksteins und Andesits in einen engen Bereich zusammen.

Die Variation der Art des Aufgabematerials zeigt, dass Andesit und Diabas gröber brechen als Kalkstein. Mit zunehmender Spaltweite entsteht jedoch auch für Kalkstein zunehmend weniger Feinanteil. Dieser Zusammenhang dürfte jedoch auf das unterschiedliche Materialverhalten von Kalkstein und Andesit bei Druckbeanspruchung zurückzuführen sein.

Massedurchsatz

Hinsichtlich des Massedurchsatzes zeigen die Versuche, dass dieser mit steigender Walzenumfangsgeschwindigkeit erwartungsgemäß zunächst ebenfalls größer wird, wobei der Maximaldurchsatz der Versuche in dieser Arbeit bei ca. 800 t/h liegt. Der Anstieg ist jedoch nicht linear, sondern degressiv. Mit zunehmender Walzenumfangsgeschwindigkeit wird die Steigerung des Durchsatzes immer kleiner, bis er bei bestimmten Parameterkombinationen wieder abfällt. Der Anstieg des Durchsatzes ordnet sich nach Fraktionsgrößen, beginnend mit dem größten Anstieg bei der Fraktion 3/32 mm. Abhängig von den Einzugsbedingungen gibt es eine Grenzggeschwindigkeit, bei welcher der maximale Durchsatz erreicht wird. Ursächlich dafür scheinen die Einzugsbedingungen zu sein, welche sich bei steigender Walzenumfangsgeschwindigkeit verschlechtern. Es kommt vermehrt zum „Tanzen“ und Verweilen der Partikel oberhalb der Walzen. Dabei werden höchstens kleine Teile der Partikel abgetrennt, wobei es aber zu keinem Einzug des Gesamtpartikels in den Brechspalt kommt. Dies tritt umso früher ein, je größer die Partikel sind und je kleiner der Walzenspalt ist.

Für den Füllungsgrad im engsten Walzenspalt von 50 mm ergeben sich Werte zwischen 0,14 bis 1,1. Allgemein wird der Füllungsgrad mit zunehmender Walzenumfangsgeschwindigkeit kleiner. Je größer die Aufgabefraktion, desto niedriger liegen die Füllungsgrade und desto stärker ist die Abnahme mit zunehmender Umfangsgeschwindigkeit.

In den Versuchen konnte kein signifikanter Einfluss der Art des Aufgabematerials auf den Durchsatz nachgewiesen werden. Die erzielten Durchsätze liegen trotz verschiedener Materialien unterschiedlicher Druckfestigkeit bei sonst gleichen Parametern dicht beieinander.

Bezüglich des Einflusses der Spaltweite kann festgestellt werden, dass der Durchsatz mit steigendem Spalt im untersuchten Bereich annähernd linear wächst. Für hinreichend gute Einzugsbedingungen ergibt sich bei Verdopplung der Spaltweite auch ein doppelt so großer Durchsatz. Der Füllungsgrad ist dabei für die jeweiligen Partikelgrößenfraktionen weitestgehend unabhängig von der Spaltweite. Geringere Abweichungen vor allem bei kleinem Spalt und großer Aufgabepartikelgröße sind durch verschlechterte Einzugsbedingungen zu erklären.

Die Variation der Aufgabepartikelgröße zeigt einen starken Einfluss auf den Massedurchsatz. Vor allem übergroße, nicht sofort einziehbare Partikel senken den Durchsatz aufgrund ihrer hohen Verweilzeiten überproportional stark. Bei einer Spaltweite von 90 mm sinkt der Durchsatz für Kalkstein von ca. 310 t/h (Aufgabefraktion 60/120 mm) auf nur noch ca. 20 t/h (Aufgabefraktion 120/160 mm), was einer Verringerung um ca. 94 % entspricht. Folglich liegen auch die Füllungsgrade der Versuche mit Überpartikeln mit Werten von 0,01 bis 0,03 sehr niedrig. Der Abfall ist umso stärker, je höher die Walzenumfangsgeschwindigkeit ist. Weiterhin scheint der Zusammenhang zwischen Füllungsgrad und Partikelgröße näherungsweise linear zu sein. Die Steigungen der Geraden für sofort einziehbare und übergroße Partikeln unterscheiden sich jedoch stark.

Modell – Partikelgrößenverteilung des Produktes

Für die Modellbildung zur Prognose der Partikelgrößenverteilung wird in dieser Arbeit die Swebrec-Funktion verwendet. Diese Funktion ist eine recht neue Verteilungsfunktion zur Beschreibung von Brechprodukten, die auf nur drei Größen aufbaut, nämlich der maximalen Produktpartikelgröße $x_{P,max}$, der Partikelgröße $x_{P,50}$ und dem Kurvencharakteristikkfaktor b , welcher die Steigung der Verteilung bestimmt. Die Prüfung der Eignung dieser Funktion ergab, dass die Produktverteilungskurven aller drei Gesteine (Kalkstein, Andesit und Diabas) mit der Swebrec Funktion gut beschreibbar sind, wobei sich ein durchgehend hohes Bestimmtheitsmaß von mindestens 0,994 ergab. Zur Prognose der Partikelgrößenverteilung ist nun die Kenntnis der Zusammenhänge der drei abhängigen Größen notwendig. Die Auswertung der Partikelgrößenverteilungen der Brechprodukte zeigt, dass die maximale Partikelgröße der Produkte des Versuchsbrechers von der Spaltweite s_{r5} abhängt (Abstand der Grundkreisradien der Walzen) und mit folgender Formel beschrieben werden kann:

$$x_{P,max} = 1,24 \cdot s_{r5} \quad (6.1)$$

Die Prognose des $x_{P,50}$ -Wertes des Produktes stellt sich nicht trivial dar, da zwischen dem $x_{P,50}$ -Wert der Versuchsprodukte und der Spaltweite kein unmittelbarer Zusammenhang besteht, der mit einer Funktion beschreibbar ist. Die Partikelgrößenverteilung der Produkte ist zu sehr von der Verteilung des Aufgabegutes bestimmt, sodass sich keine alleinige Abhängigkeit von der Spaltweite ergibt. Daher wird im Rahmen der Modellbildung der Feinanteil der Aufgabe kleiner einer bestimmten Trennspaltweite, welcher unzerkleinert durch den Walzenspalt ins Produkt gelangen würde, von der Partikelgrößenverteilung der Produkte abgezogen, sodass sich rein rechnerisch ein Produkt der Bezeichnung P_{exp}^* ergibt. Die Trennspaltweite kann der Spaltweite s_{r2} (Abstand zwischen Grundkreisradius der einen und dem Werkzeug der anderen Walze) gleichgesetzt werden. Für den $x_{P,50}$ -Wert dieses rechnerisch ermittelten Produktes ergibt sich für Kalkstein ein mit folgender Formel beschreibbarer Zusammenhang in Abhängigkeit der Spaltweite:

$$x_{P^*,50} = 0,91 \cdot s_{r5} - 20,87 \quad (6.2)$$

Die Approximation der Produkte P_{exp}^* mittels der Swebrec-Funktion ergibt einen Kurvencharakteristikfaktor b^* von 2,43 für Kalkstein. Zur Prognose eines Produktes von Kalkstein einer bestimmten Spaltweite wird nun zunächst die maximale Partikelgröße und der x_{50} -Wert des zu prognostizierenden Produktes P_{mod}^* errechnet. Anschließend wird der Feinanteil der Aufgabe kleiner der Trennspaltweite zur prognostizierten Verteilung des Produktes P_{mod}^* addiert, sodass sich im Ergebnis die tatsächlich zu erwartende Produktpartikelgrößenverteilung ergibt. Dieses Modell wurde anhand unterschiedlichster Aufgabeverteilungen von Einzelfractionen und Mischungen für unterschiedliche Spaltweiten erprobt. Der Vergleich von prognostizierten Modellwerten und experimentell ermittelten Werten zeigt eine geringe Abweichung von charakteristischen Parametern der Partikelgrößenverteilung. Im Mittel aller Versuche beträgt die Abweichung der $x_{P,25}$, $x_{P,50}$ und $x_{P,80}$ -Werte nur 2,3 mm bis 2,5 mm. Damit kann eine hohe Modellgüte belegt werden. Dieses Modell wurde auch für die anderen beiden Gesteine getestet, wobei sich ebenfalls sehr gute Ergebnisse zeigen. Es ist jedoch zu beachten, dass in diesem Fall die Datenbasis geringer ist als bei Kalkstein.

Modell - Massedurchsatz

Für die Prognose des Durchsatzes wird ein Modell entwickelt, mit dem die Vorhersage des Massedurchsatzes für beliebige Mischungen von Partikelfractionen unter der Berücksichtigung von Überpartikeln (nicht sofort einziehbare Partikel) möglich ist. Dazu wird eine Modellhypothese formuliert, die besagt, dass eine Materialmischung mit einer bestimmten Masse dieselbe Zeit zum Durchtritt durch den Walzenspalt benötigt, wie alle Einzelfractionen, in welche die Mischung ggfs. zuvor aufgeteilt wurde, nacheinander. Nach dieser Modellhypothese ergibt sich die folgende Formel:

$$\dot{m} = \frac{1}{\sum \frac{\mu_i}{\dot{m}_i}} \quad (6.3)$$

Mit dieser Formel kann unter der Kenntnis der Masseanteile μ_i einer Mischung, welche zur Auslegung eines Walzenbrechers bekannt sein sollten, und den entsprechenden Fraktionsmassedurchsätzen \dot{m}_i der Massedurchsatz einer Materialmischung prognostiziert werden. Im Weiteren sind die Fraktionsmassedurchsätze neben den bekannten Größen Spaltfläche, Walzenumfangsgeschwindigkeit und der Dichte des Materials, auch vom Füllungsgrad abhängig. Auf Basis der experimentellen Ergebnisse wurde ein empirischer Zusammenhang von Füllungsgrad und Partikelgröße für unterschiedliche Walzenumfangsgeschwindigkeiten unabhängig von der Spaltweite entwickelt, der die Bestimmung des Füllungsgrades ermöglicht. Zur Prüfung der Leistungsfähigkeit des Modells wurden die Modellwerte mit den experimentell ermittelten Werten verschiedener Einzelfractionen und Materialmischungen unterschiedlicher Zusammensetzung mit und ohne Überpartikel verglichen. Im Ergebnis zeigt sich, dass mit dem Modell teilweise geringfügig zu hohe aber auch zu niedrige Durchsätze errechnet werden. Für Materialmischungen werden tendenziell eher zu niedrige Werte prognostiziert. Rund 80 % der Modellwerte weisen eine Abweichung kleiner 15 % auf. Die Modellwerte der Einzelfractionen

zeigen eine geringere Abweichung als die der Mischungen. Die maximale Abweichung beträgt dabei ca. 23 %. Mit Hilfe des Berechnungsmodells lässt sich auch der Einfluss von übergroßen Partikeln auf den Massedurchsatz zeigen. Bereits bei einem Überpartikelanteil von nur 0,8 % der Fraktion 200/250 mm in der Fraktion 32/63 mm des Kalksteins verringert sich der Durchsatz für eine Walzenumfangsgeschwindigkeit von 4 m/s und eine Spaltweite von 50 mm um ca. 30 % von ca. 236 t/h auf ca. 169 t/h. Daher gilt es, in der Praxis den Überpartikelanteil im Aufgabematerial zu vermeiden bzw. so gering wie möglich zu halten.

Zusammenfassend ist einzuschätzen, dass sich Walzenbrecher mit den entwickelten Prognosewerkzeugen zuverlässiger auslegen lassen als bisher. In einem nächsten Schritt sollten die entwickelten Modelle an Brechern im Industriemaßstab verifiziert werden. Aufgrund des großen Maßstabs des Versuchsbrechers in halbindustrieller Größe und der praxisnahen Versuchsmaterialien und -bedingungen ist mit verhältnismäßig geringem Anpassungsbedarf der Modelle zu rechnen.

Literaturverzeichnis

- [1] Engineering and Mining Journal. Mining Media International, Jacksonville, Vol. 219, Nr. 3, S. 56, März 2018
- [2] Lieberwirth, H.: Which Crusher?. World Coal, S. 41 - 50, September 2011
- [3] Engineering and Mining Journal. Mining Media International, Jacksonville, Vol. 218, Nr. 11, S. 70-71, November 2017
- [4] Cleary, P. W., Sinnott, M. D.: Simulation of particle flows and breakage in crushers using DEM: Part 1 - Compression crushers. Minerals Engineering, Vol. 74, S. 178-197, 2018
- [5] Sommer, H.: Zahnwalzenbrecher in der Aufbereitung. Aufbereitungstechnik, Nr. 5, S. 248-253, 1964
- [6] Wills, B.A. und Napier-Munn, T.J.: Mineral Processing Technology. 7. Auflage, Elsevier, Amsterdam u.a., 2006
- [7] Höfl, K.: Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen. 1. Auflage, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1985
- [8] Unland, G.: The Principals of Single-Particle Crushing. In: Handbook of Powder Technology, Vol. 12, Elsevier, Amsterdam u.a., 2007.
- [9] Schmidt, M.: Modellierung der Zerkleinerung in Profilwalzenbrechern. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 2011
- [10] von der Ohe, W.: Einzelkorn-Druckzerkleinerung in einem Walzenspalt mit und ohne Friktion. Dissertation, TH Karlsruhe, 1967
- [11] Höfl, K.: Maschinen zur Aufbereitung und Verarbeitung fester mineralischer Rohstoffe. Band 2, Lehrmaterial (unveröffentlicht)
- [12] Leonhardt, J., Schieder, T.: Untersuchung des Zerkleinerungsverhaltens von Gruben- und Waschbergen im Hinblick auf die weitere Verwendung. Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Luxemburg, 1989
- [13] Schubert, H.: Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe. Band 1. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1989
- [14] AT Crushing Technology. Bauverlag, Gütersloh, 2018
- [15] Halbach & Braun Maschinenfabrik GmbH & Co.
<http://www.halbach-braun.de/index.php/de/produkte/2-uncategorised/24-walzenbrecher>,
Zugriff: 05. 07. 2018

- [16] NHP Sizers. http://www.mineralsizer.com/MINERAL_SIZERS.html, Zugriff: 05. 07. 2018
- [17] Stieß, M.: Mechanische Verfahrenstechnik 2, Springer, Berlin u.a., 1994
- [18] Motek, O.H.: Praxis der Hartzerkleinerung. Aufbereitungstechnik. Nr. 10, S. 653-658, 1972
- [19] Mölling, H. A.: Berechnungsansätze für Grobzerkleinerungsmaschinen. Aufbereitungstechnik, Nr. 2, S. 77-79, 1967
- [20] Mukhopadhyaya, A.K., Gupta, A., Singhal, V.: Mechanics of Crushing in a Rollcrusher and Its Performance Analysis. Bulk Solids Handling, Vol. 22, No. 5, 2002
- [21] Wittel, H. et al.: Roloff/Matek Maschinenelemente. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2017
- [22] Grote, K. H.: Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer, Berlin Heidelberg, 2011
- [23] Popov, V. L.: Kontaktmechanik und Reibung. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009
- [24] Schubert, H. (Hrsg.): Handbuch der mechanischen Verfahrenstechnik, Band 1. Wiley-VCH, Weinheim, 2003
- [25] Höfl, K.: Maschinen für Aufbereitungs- und Verarbeitungsprozesse. Studienmaterial, Heft 3, Bergakademie Freiberg, 1977
- [26] Heng, R. et al.: Mechanistic modeling of mineral sizers. Minerals Engineering 16, S. 807-813, 2003
- [27] Cesnek, V.: Die Entwicklung und Erprobung eines neuartigen Zweiwalzenbrechers für die Zerkleinerung von lignitischer Braunkohle. Bergbauwissenschaften Nr.5, S. 176ff, 1968
- [28] Gupta, A. und Yan, D. S.: Mineral Processing Design and Operation. Elsevier, Amsterdam u. a., 2006
- [29] Mölling, H. A.: Grundfragen der Grobzerkleinerung. Aufbereitungstechnik. Nr. 7, S. 287-298, 1960
- [30] Tarján, G.: Mineral Processing - Fundamentals, Comminution, Sizing and Classification. Volume 1, Verlag Akadémiai Kiadó, Budapest, 1981
- [31] Hodel, J.: Grundlagen zur Konstruktion von Hartzerkleinerungsmaschinen. Technische Mitteilung Krupp Werkberichte, Band 23, Heft 4, S. 179-188, 1965, aus: SCHMIDT [9]
- [32] Otte, O.: Proceedings of the Third Mill Operators Conference. Australasien Institute of Mining and Metallurgy, Cobar, 05/1988, S. 131-136, aus: GUPTA [28]

- [33] Naundorf, W.: Beitrag zu den Gesetzmäßigkeiten bei der Zerkleinerung von Weichbraunkohle in Stachelwalzen- und Flügelbrechern. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 1969
- [34] Lowrison, G. C.: Crushing and Grinding - The Size Reduction of Solid Materials. Butterworth, London, 1974
- [35] Ouchterlony, F. und Moser, P.: Die Swebrec-Funktion: Eine neue Korngrößenverteilungsfunktion und ihr praktischer Einsatz in der Sprengtechnik. BHM, 151 (2006), Heft 10, S. 389-404
- [36] Ouchterlony, F.: "Bend it like Beckham" or a Wide-range yet Simple Fragment Size Distribution for Blasted and Crushed Rock. Less Fines Project, Technischer Bericht 78, EU project GRD-2000-25224 (Montanuniversität Leoben, Österreich)
- [37] Napier-Munn, T. J.: Mineral Comminution Circuits - Their Operation and Optimization. Band 2, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, Indooroopilly, 2005
- [38] Silbermann, F.: Beitrag zur Modellierung der Arbeitsweise von Kegelbrechern in Bezug auf den Materialstrom. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 2004
- [39] Whiten, W. J.: The Simulation of Crushing Plants with Models Developed using Multiple Spline Regression. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, S. 257-264, Mai 1972
- [40] Austin, L. G., Van Orden, D. R., Pérez, J. W.: A preliminary analysis of smooth roll crushers, International Journal of Mineral Processing, 6, 1980 S. 321-336
- [41] Prasher, C. L.: Crushing and Grinding Process Handbook, John Wiley & Sons Limited, Chichester u. a., 1987
- [42] JKTech: Drop Weight Test in Detail. PDF:
https://jktech.com.au/sites/default/files/brochures/LabServices_DWTest_Indetail.pdf,
Zugriff: 14.01.2019
- [43] HENSE Wägetechnik GmbH: Montage- und Bedienungsanleitung: Wiegerahmen + Auswerteelektronik BW10. Rev. 5
- [44] DIN EN 1926: Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung der einachsigen Druckfestigkeit. März 2007
- [45] ISRM - International Society for Rock Mechanics: Suggested Method for determining point load strength. ISRM Commission on Testing Methods, Working Group on Revision of the Point Load Test Method, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech, Vol. 22, 2, S- 51-60, 1985

- [46] Brook, N.: The Equivalent Core Diameter Method of Size and Shape Correction in Point Load Testing. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech, Vol. 22, S. 61-70, 1985
- [47] Broch, E. und Franklin, J. A.: The Point-Load Strength Test. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech, Vol. 9, S. 669-697, 1972.
- [48] Thuro, K.: Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb - Geologisch-felsmechanische Untersuchungen anhand sieben ausgewählter Tunnelprojekte. Münchner Geologische Hefte, Reihe B: Angewandte Geologie, B1, 1996
- [49] Thuro, K.: Empfehlung Nr. 5 „Punktlastversuche an Gesteinsproben“ des Arbeitskreises 3.3 „Versuchstechnik Fels“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik. Bautechnik, Band 87, Vol. 6, 2010
- [50] Popov, O.: Beitrag zur mathematisch-petrographischen Gefügecharakterisierung für die Beurteilung der Festgesteine hinsichtlich ihrer Aufbereitung und ihrer Produkteigenschaften. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 2007
- [51] Raaz, V.: Charakterisierung der Gesteinsfestigkeit mit Hilfe eines modifizierten Punktlastversuches. Z. geol. Wiss., Band 30, 2, S. 213-226, 2002
- [52] ISRM - International Society for Rock Mechanics: Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech, 15, S. 319–368, 1978
- [53] DIN EN 933-1: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen. Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren, März 2012
- [54] Löffler, F. und Raasch, J.: Grundlagen der mechanischen Verfahrenstechnik. Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 1992
- [55] DIN EN 13450: Gesteinskörnungen für Gleisschotter. Juni 2003
- [56] DIN EN 1097-3: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen. Teil 3: Bestimmung von Schüttdichte und Hohlraumgehalt, Juni 1998
- [57] Cronenberger Steinindustrie Franz Triches GmbH & Co. KG: Prüfzeugnis Nr.: 2289/16/15 Gleisschotter Mammendorf, Dezember 2015
- [58] DIN EN 1097-6: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen. Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und Wasseraufnahme, September 2013
- [59] Mitteldeutsche Hartsein-Industrie GmbH: Prüfzeugnis S-15189-DD/PM. Januar 2016
- [60] DIN EN 932-1: Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen. Teil 1: Probenahmeverfahren, November 1996

-
- [61] Klichowicz, M.: Bestimmung der Mahlbarkeit von Feststoffen und der Energieeffizienz von Zerkleinerungsprozessen auf der Grundlage von Einzelkornversuchen. Masterarbeit, TU Bergakademie Freiberg, 2013
- [62] Xu, Z.: Maschinenparametereinfluss bei der Zerkleinerung von Gesteinen in einem Profilwalzenbrecher. Bachelorarbeit, TU Bergakademie Freiberg, 2016

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Black-Box-Modell eines Walzenbrechers	3
Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Profilwalzenbrechers.....	4
Abbildung 3: Einfluss- und Zielgrößen der Zerkleinerung in Profilwalzenbrechern.....	5
Abbildung 4: Typ, Form und Kinematik der beiden Grundkörper eines Walzenbrechers	7
Abbildung 5: Schema zur Einteilung von Werkzeugformationen bei Profilwalzenbrechern.....	8
Abbildung 6: Abmessung von Grundkörper und Werkzeugen einer Walze zur Beschreibung der Werkzeugform	8
Abbildung 7: Klassifizierung der Werkzeugform von Profilwalzenbrechern nach SCHMIDT	9
Abbildung 8: Einordnung von Walzenbrechern nach der Belastungsart.....	10
Abbildung 9: Skizze zur Herleitung der Einzugsbedingung sowie der Aufgabepartikelgröße für den Haftreibungsfall.....	11
Abbildung 10: Skizze zur Herleitung der Einzugsbedingung für den Gleitreibungsfall	13
Abbildung 11: Abhängigkeit des Gleitreibungskoeffizienten μ_G von der Walzenumfangs- geschwindigkeit berechnet nach verschiedenen Literaturangaben	15
Abbildung 12: Füllungsgrad φ_{F1} in Abhängigkeit des Zerkleinerungsverhältnisses ε für Glattwalzenbrecher.....	20
Abbildung 13: Füllungsgrad φ_{F1} in Abhängigkeit der Radialspaltweite s_r für Glattwalzenbrecher	21
Abbildung 14: Einfluss des Kurvencharakteristikfaktors b	24
Abbildung 15: Schematische Darstellung des WHITEN Brechermodells.....	25
Abbildung 16: Schematische Darstellung des Brechermodells von AUSTIN	27
Abbildung 17: Schematische Darstellung der Versuchsanlage.....	29
Abbildung 18: Leitelemente vom Abwurfpunkt des Bunkerabzugsbandes bis zum Brechereinlauf.....	30
Abbildung 19: Gesamtansicht des Walzenbrechers.....	31
Abbildung 20: 3D-Darstellung einer Brechwalze des Versuchswalzenbrechers.....	32
Abbildung 21: Relative Abweichung $\Delta_{BW,rel}$ der Bandwaage zum Sollwert in Abhängigkeit des fehlerbehafteten, gemessenen Durchsatzes \dot{m}_{Mess} der Bandwaage.....	34

Abbildung 22: Korrekturfaktor k_{BW} in Abhängigkeit des fehlerbehafteten Durchsatzwertes \dot{m}_{Mess} der Bandwaage.....	35
Abbildung 23: Versuchsplan der experimentellen Untersuchungen.....	37
Abbildung 24: Gebräuchliche Bezeichnungen für die einaxiale Druckfestigkeit von Gesteinen nach Empfehlungen der ISRM	39
Abbildung 25: Partikelgrößenverteilung der verschiedenen Aufgabematerialien unterschiedlicher Einzelfractionen	40
Abbildung 26: Partikelgrößenverteilung für Kalkstein verschiedener Mischungen	41
Abbildung 27: Behälter zur Bestimmung der Schüttdichte der Fraktion 60/120 mm	42
Abbildung 28: Dünnschliffe der untersuchten Kalksteinvarietäten (Lagerstätte Brilon)	43
Abbildung 29: Dünnschliffe des Andesits (Lagerstätte Mammendorf)	44
Abbildung 30: Dünnschliffe des Diabas (Lagerstätte Hildfeld (Winterberg))	44
Abbildung 31: Probenahmeeinrichtung am Abzugsförderer.....	47
Abbildung 32: Probenahmerahmen zum Entnehmen einer Probe vom Förderer	47
Abbildung 33: Verweilzeit in Abhängigkeit der mittleren Fraktionsgröße und Spaltweite für Einzelpartikel mit Materialdruck (Kalkstein).....	50
Abbildung 34: Verweilzeit in Abhängigkeit des Verhältnisses von Spaltweite zu mittlerer Fraktionsgröße für unterschiedliche Fraktionen von Einzelpartikeln mit Materialdruck (Kalkstein)	51
Abbildung 35: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Walzenumfangsgeschwindigkeit für Kalkstein, Aufgabefraktion 32/63 mm, Spaltweite 50 mm	53
Abbildung 36: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Walzenumfangsgeschwindigkeit für Kalkstein, Aufgabefraktion 60/120 mm, Spaltweite 70 mm ..	55
Abbildung 37: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Spaltweite für Kalkstein, Aufgabefraktion 32/63 mm, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s	57
Abbildung 38: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Spaltweite für Kalkstein, Aufgabefraktion 60/120 mm, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s	58
Abbildung 39: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit von der Aufgabeverteilung für Kalkstein, Spaltweite 50 mm, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s	59
Abbildung 40: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit von der Aufgabeverteilung für Andesit, Spaltweite 50 mm, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s.....	60

Abbildung 41: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit von der Materialart der Aufgabefraktion 32/63 mm, Spaltweite 50 mm, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s	61
Abbildung 42: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit von der Materialart der Aufgabefraktion 60/120 mm, Spaltweite 90 mm, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s	62
Abbildung 43: Messschrieb eines Versuchs mit gekennzeichneteter stationärer Phase	63
Abbildung 44: Durchlaufbetrieb	64
Abbildung 45: Betrieb mit überschüttetem Brechraum	64
Abbildung 46: Massedurchsatz-Zeitverlauf eines Versuchs mit Durchlaufbetrieb und überschüttetem Brechraum	64
Abbildung 47: Massedurchsatz in Abhängigkeit von der Walzenumfangsgeschwindigkeit für verschiedene Materialien und Aufgabefraktionen, Spaltweite 50 mm	66
Abbildung 48: Massedurchsatz in Abhängigkeit von der Spaltweite für Kalkstein für verschiedene Aufgabefraktionen, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s.....	68
Abbildung 49: Verhältnis \dot{m}/s_{aq} in Abhängigkeit von der Spaltweite für Kalkstein für verschiedene Aufgabefraktionen, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s.....	69
Abbildung 50: Massedurchsatz in Abhängigkeit von der Aufgabepartikelgröße für Kalkstein für verschiedene Spaltweiten, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s	70
Abbildung 51: Verhältnis \dot{m}/s_{aq} in Abhängigkeit von der Aufgabepartikelgröße für Kalkstein für verschiedene Spaltweiten, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s	70
Abbildung 52: Kurvenanpassung mittels Swebrec-Funktion	73
Abbildung 53: Mittlere Partikelgröße des Produktes $x_{P,50}$ in Abhängigkeit des Walzenspaltes s_{r5} für Kalkstein für verschiedene Aufgabefraktionen/Mischungen	75
Abbildung 54: Schema zum erweiterten Ansatz zur Prognose der Partikelgrößenverteilung des Produktes.....	76
Abbildung 55: Schematische Abbildung zur Definition unterschiedlicher Spaltweiten.....	76
Abbildung 56: Mittlere Partikelgröße $x_{P^*,50}$ des Produktes P_{exp}^* in Abhängigkeit des Walzenspaltes s_{r5} für Kalkstein für verschiedene Aufgabefraktionen/Mischungen	77
Abbildung 57: Vergleich der Produktpartikelgrößenverteilungen, experimentell ermittelt und mit Modell prognostiziert	78

Abbildung 58: Vergleich der $x_{P,80}$ -Werte von Modell und Experiment für Kalkstein	79
Abbildung 59: Vergleich der $x_{P,50}$ -Werte von Modell und Experiment für Kalkstein	79
Abbildung 60: Vergleich der $x_{P,25}$ -Werte von Modell und Experiment für Kalkstein	79
Abbildung 61: Mittlere Partikelgröße $x_{P^*,50}$ des Produktes P_{exp}^* in Abhängigkeit des Walzen- spaltes s_{r5} für Andesit und Diabas für verschiedene Aufgabefraktionen.....	80
Abbildung 62: Vergleich der $x_{P,80}$ -Werte von Modell und Experiment für Andesit/Diabas	81
Abbildung 63: Vergleich der $x_{P,50}$ -Werte von Modell und Experiment für Andesit/Diabas	81
Abbildung 64: Vergleich der $x_{P,25}$ -Werte von Modell und Experiment für Andesit/Diabas	81
Abbildung 65: Vergleich der experimentell ermittelten Massedurchsätze mit den Modellwerten, für Kalkstein	85
Abbildung 66: Mittlerer Füllungsgrad φ_{F1} in Abhängigkeit von der Aufgabepartikelgröße $x_{A,95}$ für Kalkstein für verschiedene Walzenumfangsgeschwindigkeiten.....	87
Abbildung 67: Vergleich der experimentell ermittelten Massedurchsätze mit den Modell- werten	87
Abbildung 68: Kalibrierkurve der ersten und zweiten Kalibrierung der Bandwaage	A-2
Abbildung 69: Korrekturfaktor der ersten und zweiten Kalibrierung der Bandwaage.....	A-2
Abbildung 70: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Walzenumfangs- geschwindigkeit für Andesit, Aufgabefraktion 32/63 mm, Spaltweite 50 mm.....	A-3
Abbildung 71: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Walzenumfangs- geschwindigkeit für Diabas, Aufgabefraktion 32/63 mm, Spaltweite 50 mm.....	A-3
Abbildung 72: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Walzenumfangs- geschwindigkeit für Kalkstein, Aufgabefraktion 32/63 mm, Spaltweite 70 mm ..	A-4
Abbildung 73: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Walzenumfangs- geschwindigkeit für Kalkstein, Aufgabefraktion 32/63 mm, Spaltweite 90 mm ..	A-4
Abbildung 74: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Walzenumfangs- geschwindigkeit für Kalkstein, Aufgabefraktion 60/120 mm, Spaltweite 50 mm	A-5
Abbildung 75: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Walzenumfangs- geschwindigkeit für Diabas, Aufgabefraktion 60/120 mm, Spaltweite 90 mm ...	A-5
Abbildung 76: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Spaltweite für Kalkstein, Aufgabemischung 0/120 mm 1-2-1, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s	A-6

- Abbildung 77: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Spaltweite für Kalkstein, Aufgabemischung 0/120 mm 1-1-4, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s A-6
- Abbildung 78: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Spaltweite für Andesit, Aufgabefraktion 60/120 mm, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s A-7
- Abbildung 79: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit von der Materialart der Aufgabefraktion 60/120 mm, Spaltweite 50 mm, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s A-7
- Abbildung 80: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit von der Materialart der Aufgabefraktion 60/120 mm, Spaltweite 70 mm, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s A-8
- Abbildung 81: Massedurchsatz in Abhängigkeit von der Walzenumfangsgeschwindigkeit für verschiedene Materialien und Aufgabefraktionen, Spaltweite 70 mm A-9
- Abbildung 82: Massedurchsatz in Abhängigkeit von der Walzenumfangsgeschwindigkeit für verschiedene Materialien und Aufgabefraktionen, Spaltweite 90 mm A-9
- Abbildung 83: Massedurchsatz in Abhängigkeit von der Spaltweite für Kalkstein für verschiedene Aufgabefraktionen, Walzenumfangsgeschwindigkeit 2 m/s A-10
- Abbildung 84: Massedurchsatz in Abhängigkeit von der Spaltweite für Kalkstein für verschiedene Aufgabefraktionen, Walzenumfangsgeschwindigkeit 6 m/s A-10
- Abbildung 85: Massedurchsatz in Abhängigkeit von der Spaltweite für Kalkstein für verschiedene Aufgabefraktionen, Walzenumfangsgeschwindigkeit 8 m/s A-11
- Abbildung 86: Massedurchsatz in Abhängigkeit von der Partikelgröße für Kalkstein für verschiedene Spaltweiten, Walzenumfangsgeschwindigkeit 2 m/s A-11
- Abbildung 87: Massedurchsatz in Abhängigkeit von der Partikelgröße für Kalkstein für verschiedene Spaltweiten, Walzenumfangsgeschwindigkeit 6 m/s A-12
- Abbildung 88: Massedurchsatz in Abhängigkeit von der Partikelgröße für Kalkstein für verschiedene Spaltweiten, Walzenumfangsgeschwindigkeit 8 m/s A-12
- Abbildung 89: Verhältnis \dot{m}/s_{aq} in Abhängigkeit von der Partikelgröße für Kalkstein für verschiedene Spaltweiten, Walzenumfangsgeschwindigkeit 2 m/s A-13
- Abbildung 90: Verhältnis \dot{m}/s_{aq} in Abhängigkeit von der Partikelgröße für Kalkstein für verschiedene Spaltweiten, Walzenumfangsgeschwindigkeit 6 m/s A-13
- Abbildung 91: Verhältnis \dot{m}/s_{aq} in Abhängigkeit von der Partikelgröße für Kalkstein für verschiedene Spaltweiten, Walzenumfangsgeschwindigkeit 8 m/s A-14

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Literaturwerte zum Verhältnis von Walzendurchmesser zu Aufgabepartikelgröße ..17	17
Tabelle 2: Füllungsgrad φ_{F1} (bezogen auf die Schüttdichte) in Walzenbrechern19	19
Tabelle 3: Technische Daten des Versuchswalzenbrechers31	31
Tabelle 4: Experimentell untersuchte Einflussgrößen und ihr Wertebereich36	36
Tabelle 5: Herkunft der verschiedenen Versuchsmaterialien37	37
Tabelle 6: Materialfestigkeiten, charakterisiert durch Punktlastindex nach ISRM38	38
Tabelle 7: Charakteristische Parameter der Verteilungskurven der Aufgabematerialien unterschiedlicher Fraktionen40	40
Tabelle 8: Rohdichte ρ_{Roh} und Schüttdichte ρ_{Sch} der Versuchsmaterialien42	42
Tabelle 9: Quantitative Gefügedaten Andesit (Mammendorf)44	44
Tabelle 10: Quantitative Gefügedaten Diabas (Hildfeld)45	45
Tabelle 11: Anzahl an zugeführten Überpartikeln in Abhängigkeit der Fraktion.....48	48
Tabelle 12: Verwendete Maschenweiten der Analysensiebung52	52
Tabelle 13: Kennwerte der Produktpartikelgrößenverteilung zu Abbildung 35.....54	54
Tabelle 14: Kennwerte der Produktpartikelgrößenverteilung zu Abbildung 38.....57	57
Tabelle 15: Kennwerte der Produktpartikelgrößenverteilung zu Abbildung 39.....59	59
Tabelle 16: Kennwerte der Produktpartikelgrößenverteilung zu Abbildung 40.....60	60
Tabelle 17: Kennwerte der Produktpartikelgrößenverteilung zu Abbildung 41.....61	61
Tabelle 18: Nennspaltweite, Achsabstand der Walzen und Äquivalenzspaltweite.....65	65
Tabelle 19: Walzendrehzahl, Walzenumfangsgeschwindigkeit an der Zahnspitze und am Äquivalenzdurchmesser65	65
Tabelle 20: Festlegung der oberen Produktpartikelgröße $x_{P,max}$ in Abhängigkeit des Walzen- spaltes und der Aufgabefraktion73	73
Tabelle 21: Zusammenfassung der Kurvenanpassung für Kalkstein, Andesit und Diabas74	74
Tabelle 22: Maximale Produktpartikelgröße in Abhängigkeit von der Spaltweite75	75
Tabelle 23: Nennspaltweite s_{r5} und dazugehörige Trennspaltweite s_{r2}77	77

Tabelle 24: Beispiel zur Berechnung des Massedurchsatzes einer Mischung 1-2-1 ohne Überpartikel	83
Tabelle 25: Berechnete Werte für den maximalen Durchsatz der Überpartikelfraktion.....	84
Tabelle 26: Beispiel zur Berechnung des Massedurchsatzes einer Mischung 0-1-0 mit Überpartikeln der Fraktion 120/160 mm	84
Tabelle 27: Ergebnisse der einzelnen PLT für Kalkstein nach ISRM	B-1
Tabelle 28: Experimentell ermittelte $x_{P,50}$ -Werte der Kalksteinprodukte und kurvenangepasste $x_{P,50}$ -Werte der Swebrec-Funktion im Vergleich	B-1
Tabelle 29: Experimentell ermittelte $x_{P,50}$ -Werte der Andesitprodukte und kurvenangepasste $x_{P,50}$ -Werte der Swebrec-Funktion im Vergleich	B-2
Tabelle 30: Experimentell ermittelte $x_{P,50}$ -Werte des Diabasproduktes und kurvenangepasster $x_{P,50}$ -Wert der Swebrec-Funktion im Vergleich.....	B-2
Tabelle 31: Verweilzeiten der Überpartikelversuche mit Materialdruck	B-2
Tabelle 32: Nennspaltweite, Achsabstand der Walzen und Äquivalenzspaltweite.....	C-1

Symbolverzeichnis

Lateinische Symbole

Symbol	Bezeichnung	Einheit
a_W	Achsabstand der Walzen	mm
A_F	Feinanteil der Aufgabepartikelgrößenverteilung	-
A_G	Grobanteil der Aufgabepartikelgrößenverteilung	-
A_S	Spaltfläche im engsten Walzenspalt	mm ²
b	Kurvencharakteristikfaktor der Swebrec-Funktion	-
c	Umrechnungsfaktor	-
D_S	Walzendurchmesser der Zahnspitze (Profilwalze)	mm
D_W	Glattwalzendurchmesser, Grundkreisdurchmesser (Profilwalze)	mm
$D_{W,äq}$	Äquivalenter Walzendurchmesser	mm
$D_{W,min}$	Mindestwalzendurchmesser	mm
$F_{Aus,G}$	Ausstoßkraft im Gleitreibungsfall	N
$F_{Aus,H}$	Ausstoßkraft im Haftreibungsfall	N
$F_{Ein,G}$	Einzugskraft im Gleitreibungsfall	N
$F_{Ein,H}$	Einzugskraft im Haftreibungsfall	N
F_G	Gewichtskraft	N
F_{nG}	Normalkraft im Gleitreibungsfall	N
F_{nGv}	vertikale Komponente der Normalkraft im Haftreibungsfall	N
F_{nH}	Normalkraft im Haftreibungsfall	N
F_{RG}	Gleitreibungskraft im Gleitreibungsfall	N
F_{RGv}	vertikale Komponente Gleitreibungskraft im Gleitreibungsfall	N
F_{RH}	Haftreibungskraft im Haftreibungsfall	N
h_{We}	Werkzeughöhe	mm
\bar{h}_{We}	mittlere Werkzeughöhe	mm
I_S	Festigkeitsindex	MPa
$I_{S(50)}$	Punktlastindex	MPa
k_{BW}	Korrekturfaktor der Bandwaage	-
l_{Ta}	Axialteilungslänge der Werkzeuge	mm
l_{We}	Werkzeuglänge	mm
L_W	Walzenlänge	mm
L_W^*	reduzierte Walzenlänge	mm

Lateinische Symbole

Symbol	Bezeichnung	Einheit
m_G	Gesamtmasse einer Materialmischung	t
m_i	Masse einer Einzelfraktion	t
m_{ist}	Istwert der Bandwaage	t
m_{soll}	Sollwert der LKW Prüfwage	t
\dot{m}	Massedurchsatz allgemein, Massedurchsatz der Bandwaage (korrigierter Wert)	t/h
\dot{m}_i	Massedurchsatz einer Einzelfraktion	t/h
\dot{m}_{Mess}	gemessener Massedurchsatz der Bandwaage, fehlerbehaftet	t/h
n_W	Walzendrehzahl	min ⁻¹
P_{exp}^*	experimentell ermittelte Partikelgrößenverteilung des Produktes ohne Feinanteil der Aufgabepartikelgrößenverteilung	-
P_{exp}	experimentell ermittelte Partikelgrößenverteilung des Produktes	-
P_{mech}	mechanischer Leistungsbedarf	kW
P_{mod}^*	prognostizierte Modell-Partikelgrößenverteilung des Produktes ohne Feinanteil der Aufgabepartikelgrößenverteilung	-
P_{mod}	prognostizierte Modell-Partikelgrößenverteilung	-
$Q_3(x)$	Durchgangssumme in Abhängigkeit der Partikelgröße, massebezogen	%
R^2	Bestimmtheitsmaß	-
$R_{\text{äq}}$	Radius einer querschnittsflächen- oder volumengleichen Glattwalze	mm
R_m	mittlerer Radius einer Profilwalze	mm
R_S	Spitzenkreisradius einer Profilwalze	mm
R_W	Walzenradius (Glattwalze) oder Grundkreisradius (Profilwalze)	mm
s	Spaltweite, allgemein	mm
$s_{\text{äq}}$	Äquivalenzspaltweite einer volumengleichen Walze	mm
s_r	Radialspaltweite	mm
$s_{r1,2,3,5}$	spezielle Radialspaltweiten	mm
t_G	Zeit der Gesamtmasse einer Materialmischung zum Durchtritt durch den Walzenspalt	s
t_i	Zeit der Masse einer Einzelfraktionen zum Durchtritt durch den Walzenspalt	s
t_V	Verweilzeit eines Partikels im Brechraum	s
T_a	Axialteilung	-
v_G	Materialgeschwindigkeit	m/s

Lateinische Symbole

Symbol	Bezeichnung	Einheit
v_U	Walzenumfangsgeschwindigkeit	m/s
$v_{U,\text{äq}}$	Walzenumfangsgeschwindigkeit am Äquivalenzdurchmesser	m/s
\dot{V}	Volumendurchsatz	m ³ /h
w	Siebmaschenweite	mm
W_{0m}	spezifischer Arbeitsbedarf	kWh/t
V_0	spezifischer Verschleiß	g/t
x	Partikelgröße, allgemein	mm
x_5, x_{50}, x_{95}	Partikelgröße bei einer Durchgangssumme von 5 %, 50 % und 95 %	mm
x_A	Aufgabepartikelgröße	mm
$x_{A,5}, x_{A,50}, x_{A,95}$	Partikelgröße der Aufgabe bei einer Durchgangssumme von 5%, 50 %und 95 %	mm
$x_{A,\text{max}}$	maximale Aufgabepartikelgröße	mm
x_i	Einflussgröße der Zerkleinerung	-
x_m	mittlere Partikelgröße	mm
$x_{P,5}, x_{P,50}, x_{P,80}, x_{P,95}$	Partikelgröße des Produktes bei einer Durchgangssumme von 5%, 50 %, 80%und 95 %	mm
$x_{P,\text{max}}$	maximale Produktpartikelgröße	mm
$x_{P^*,50}$	Mittlere Partikelgröße des Produktes P* (ohne den Feinanteil der Aufgabe)	mm
y_j	Zielgröße der Zerkleinerung	-

Griechische Symbole

Symbol	Bezeichnung	Einheit
α	Einzugswinkel	°
α_{We}	Werkzeugwinkel	°
α_V	Teilungswinkel (Winkelversatz) der Werkzeuge	°
$\Delta_{BW,rel}$	relative Abweichung der Bandwaage zum Sollwert	%
ε	Zerkleinerungsverhältnis, allgemein	-
ε_{50}	Zerkleinerungsverhältnis bezogen auf x_{50}	-
ε_{95}	Zerkleinerungsverhältnis bezogen auf x_{95}	-
ε_s	Abbaugrad	-
λ	Längen-Durchmesser-Verhältnis einer Walze	-
μ	Reibungskoeffizient	-
μ_G	Gleitreibungskoeffizient	-
μ_H	Haftreibungskoeffizient	-
μ_i	Masseanteil einer Fraktion an der Gesamtmasse einer Mischung	-
ϱ_{Roh}	Rohdichte des Materials	kg/m ³
ϱ_{Sch}	Schüttdichte des Materials	kg/m ³
σ	Standardabweichung	-
σ_D	einaxiale Druckfestigkeit	MPa
φ_F	Füllungsgrad im engsten Walzenspalt bzgl. der Rohdichte ϱ_{Roh}	-
φ_{F0}	Verhältnis von Schüttdichte und Rohdichte des Materials	-
φ_{F1}	Füllungsgrad im engsten Walzenspalt bzgl. der Schüttdichte ϱ_{Sch}	-
φ_{F11}	Durchsatzkoeffizient	-
φ_{F12}	Koeffizient für das Einzugsverhalten eines Materials	-

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
DMS	Dehnungsmessstreifen
EP	Einzelpartikel
GB	Gutbett
GW	Glattwalze
PGV	Partikelgrößenverteilung
PLT	Point-Load-Test
PW	Profilwalze

Anhang

A	Diagramme.....	A-2
A.1	Kalibrierkurven.....	A-2
A.2	Partikelgrößenverteilung.....	A-3
A.3	Massedurchsatz.....	A-9
B	Tabellen.....	B-1
C	Berechnungen.....	C-1

A Diagramme

A.1 Kalibrierkurven

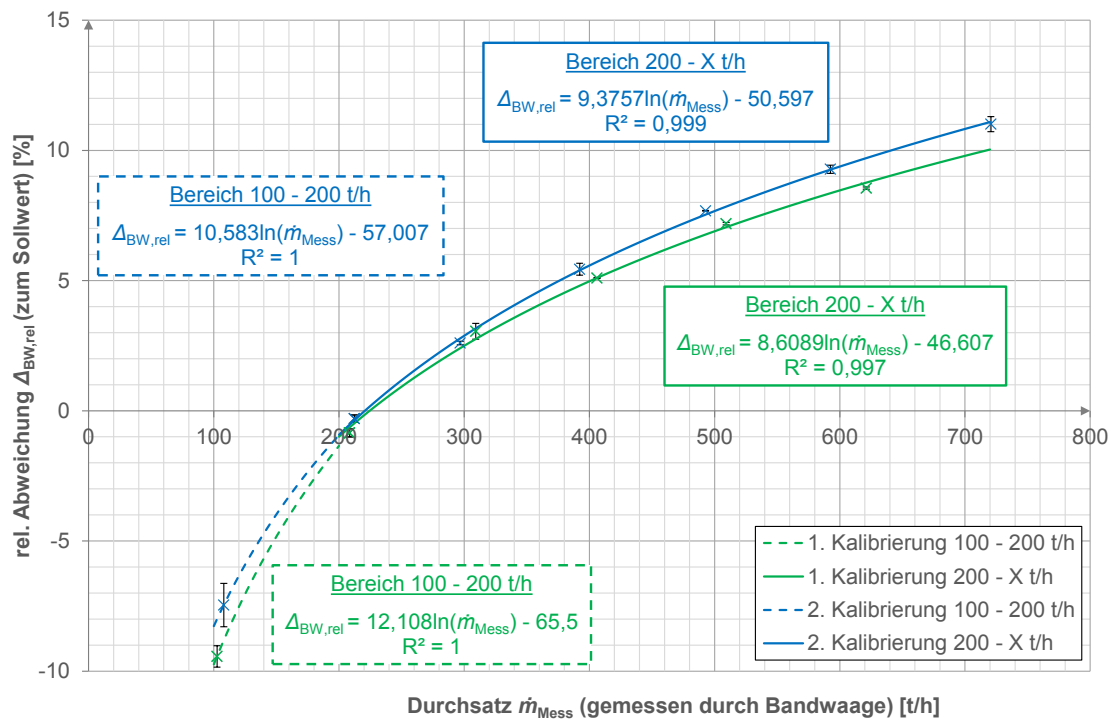


Abbildung 68: Kalibrierkurve der ersten und zweiten Kalibrierung der Bandwaage – relative Abweichung $\Delta_{BW,rel}$ der Bandwaage zum Sollwert in Abhängigkeit des fehlerbehafteten, gemessenen Durchsatzwertes \dot{m}_{Mess} der Bandwaage

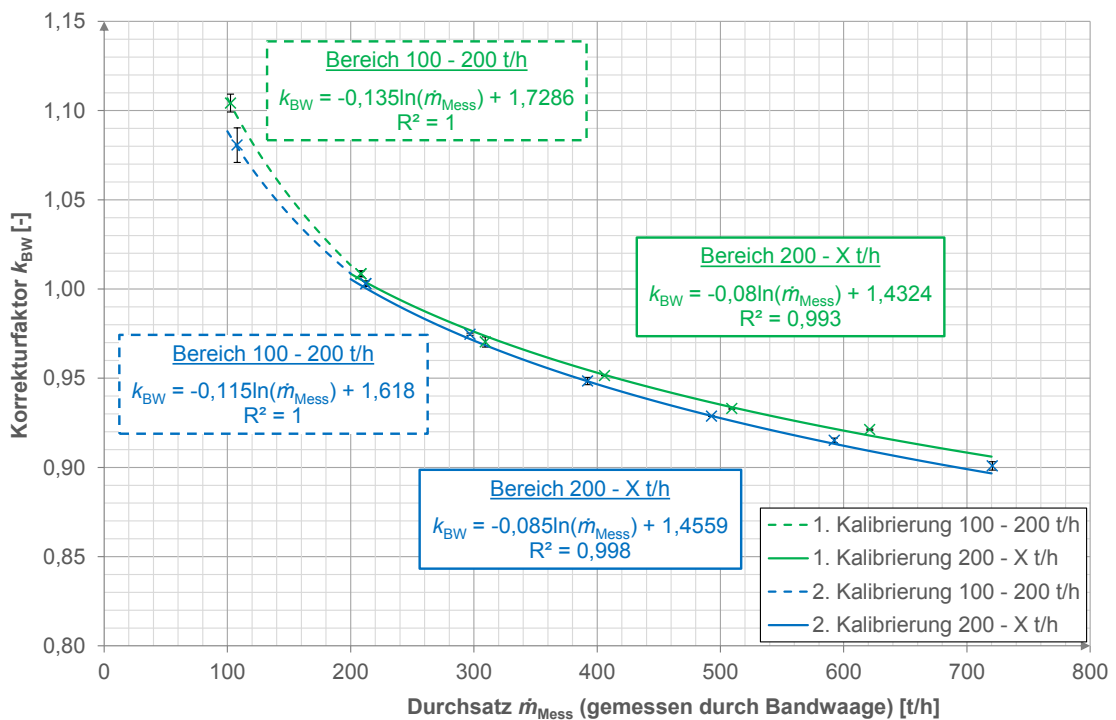


Abbildung 69: Korrekturfaktor der ersten und zweiten Kalibrierung der Bandwaage – Korrekturfaktor k_{BW} in Abhängigkeit des fehlerbehafteten Durchsatzwertes \dot{m}' der Bandwaage

A.2 Partikelgrößenverteilung

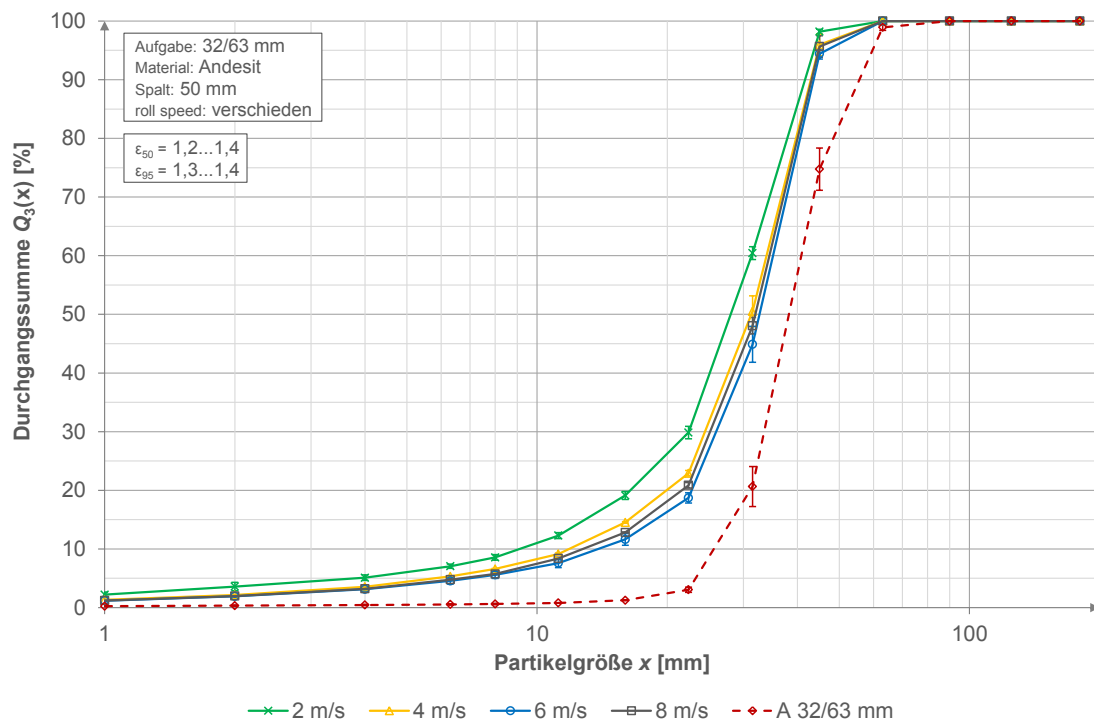


Abbildung 70: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Walzenumfangsgeschwindigkeit für Andesit, Aufgabefraktion 32/63 mm, Spaltweite 50 mm

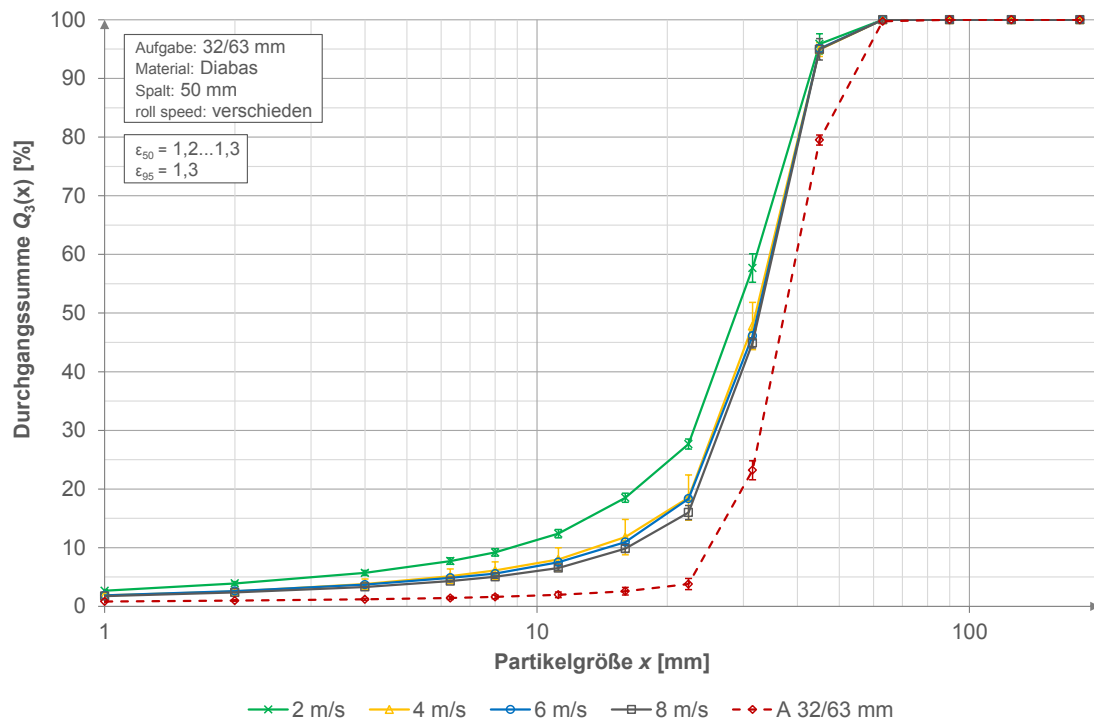


Abbildung 71: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Walzenumfangsgeschwindigkeit für Diabas, Aufgabefraktion 32/63 mm, Spaltweite 50 mm

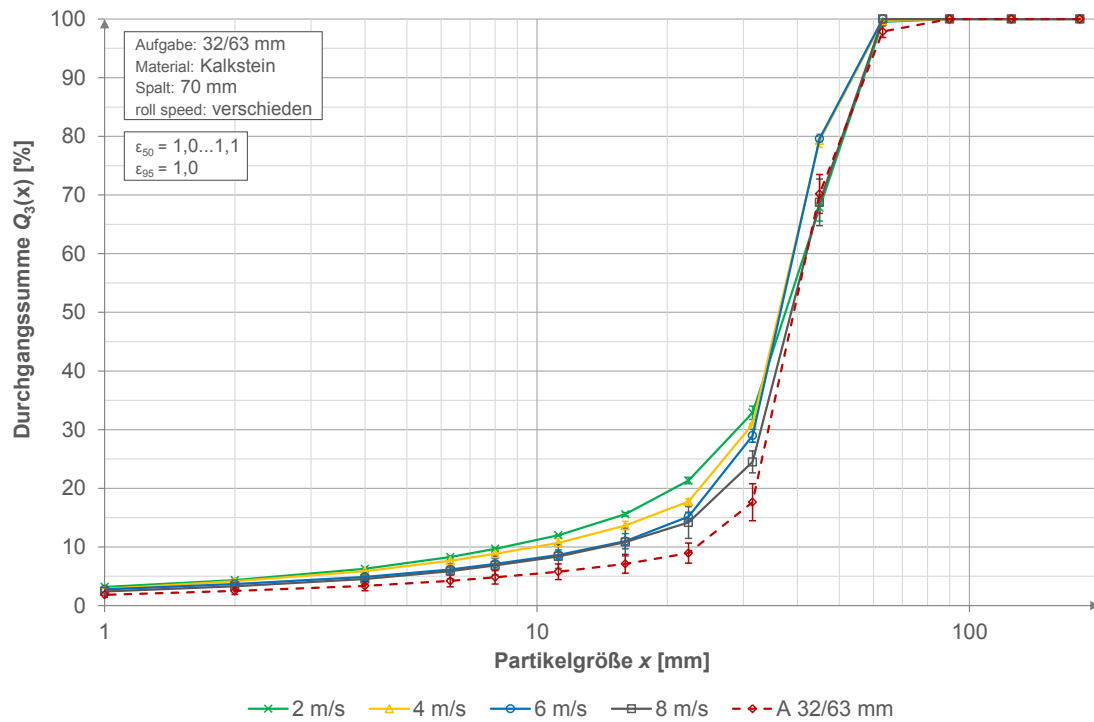


Abbildung 72: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Walzenumfangsgeschwindigkeit für Kalkstein, Aufgabefraktion 32/63 mm, Spaltweite 70 mm

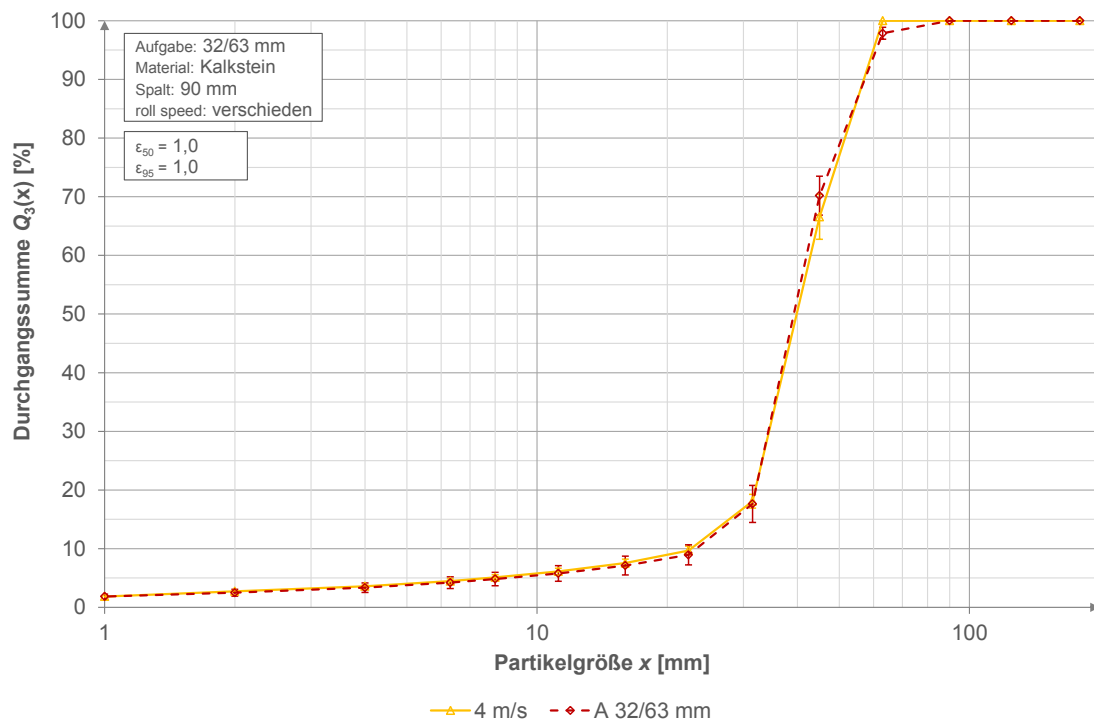


Abbildung 73: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Walzenumfangsgeschwindigkeit für Kalkstein, Aufgabefraktion 32/63 mm, Spaltweite 90 mm, nur Probenahme bei 4 m/s

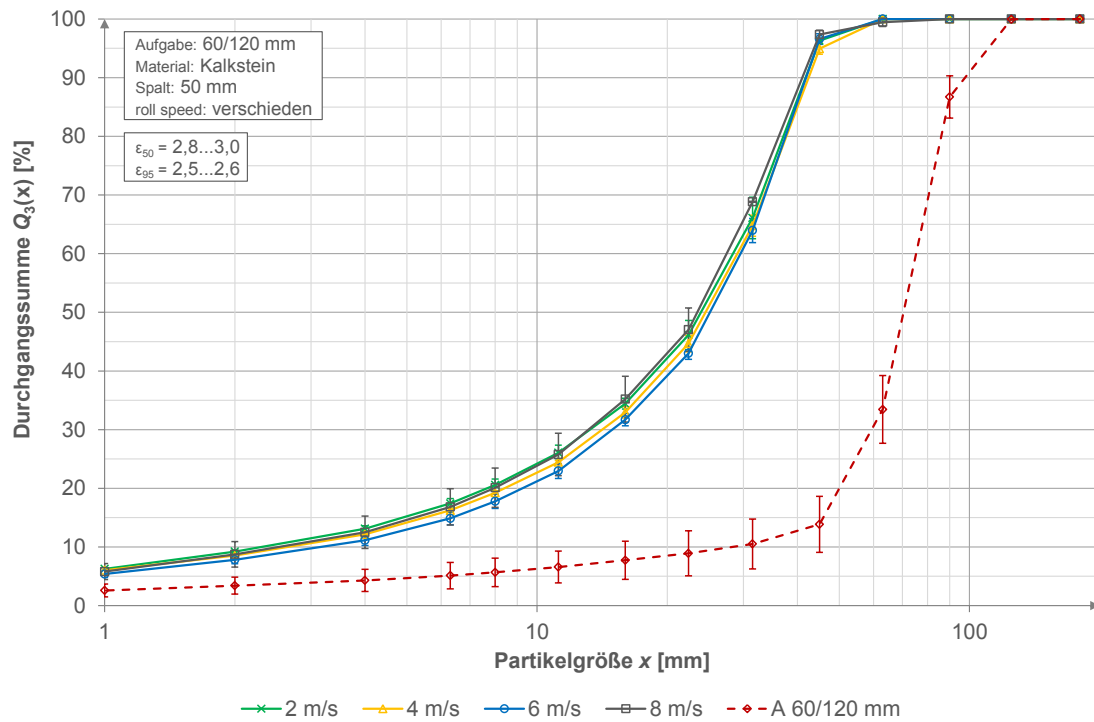


Abbildung 74: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Walzenumfangsgeschwindigkeit für Kalkstein, Aufgabefraktion 60/120 mm, Spaltweite 50 mm

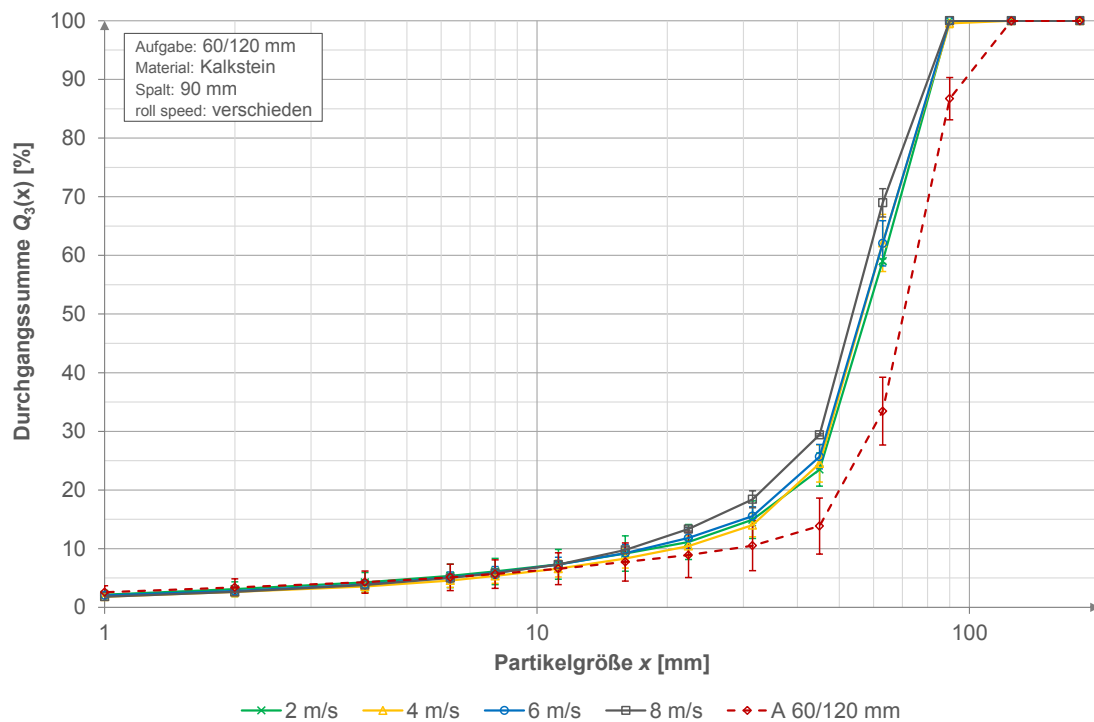


Abbildung 75: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Walzenumfangsgeschwindigkeit für Diabas, Aufgabefraktion 60/120 mm, Spaltweite 90 mm

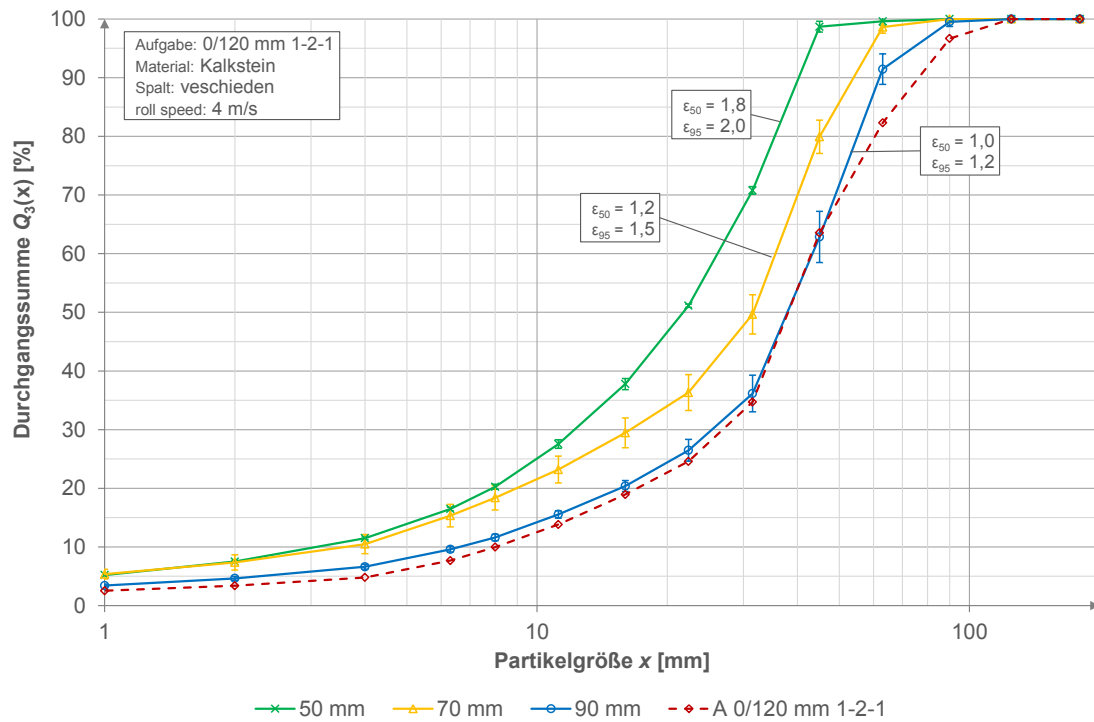


Abbildung 76: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Spaltweite für Kalkstein, Aufgabemischung 0/120 mm 1-2-1, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s

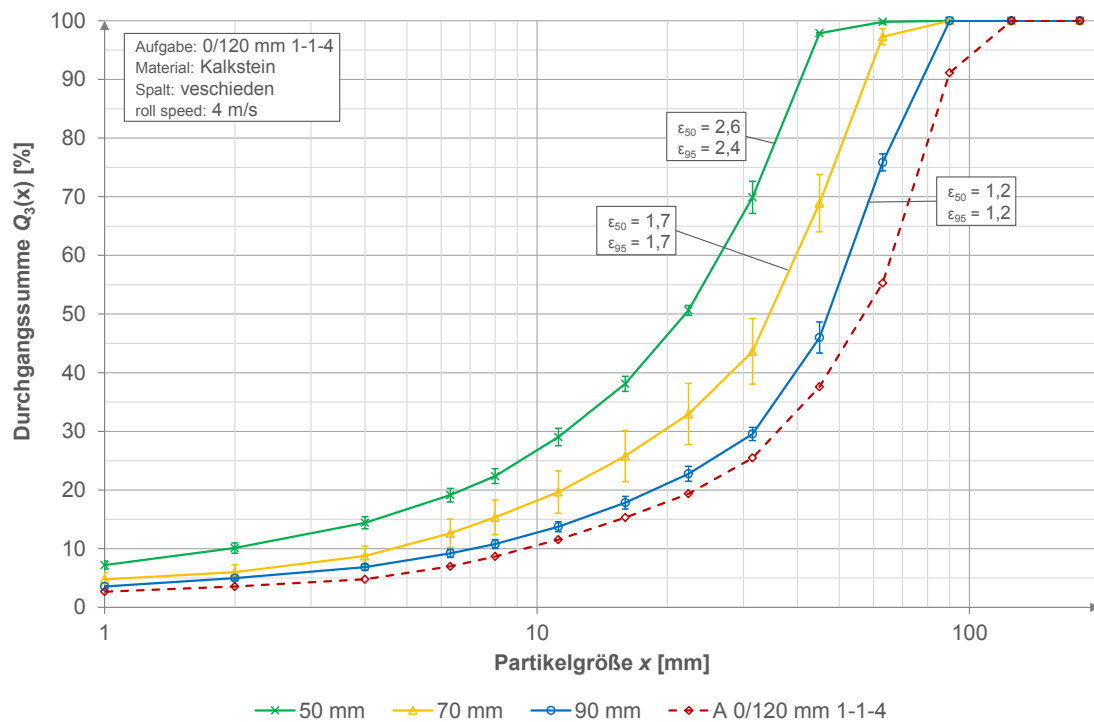


Abbildung 77: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Spaltweite für Kalkstein, Aufgabemischung 0/120 mm 1-1-4, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s

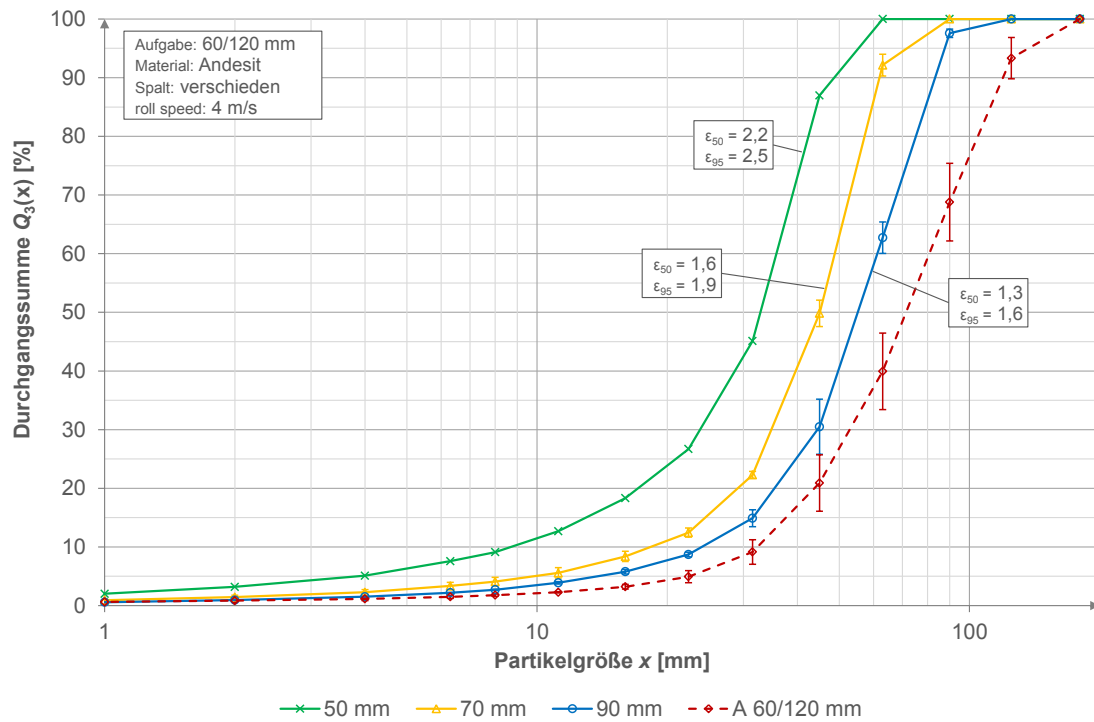


Abbildung 78: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Spaltweite für Andesit, Aufgabefraktion 60/120 mm, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s

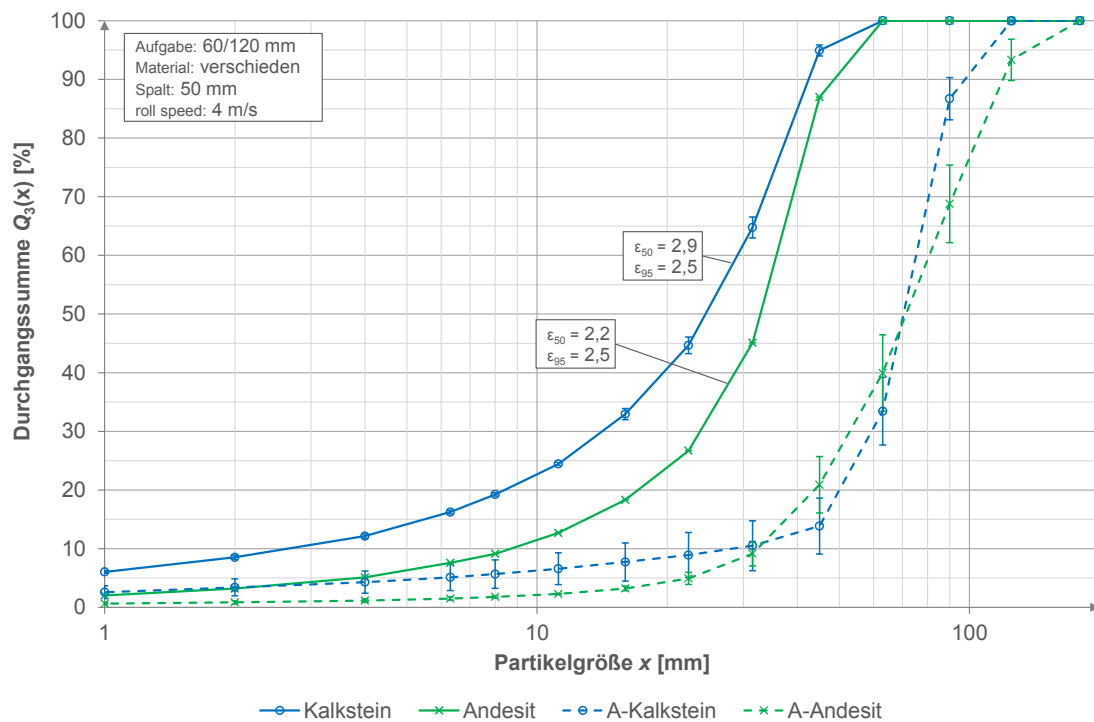


Abbildung 79: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit von der Materialart der Aufgabefraktion 60/120 mm, Spaltweite 50 mm, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s

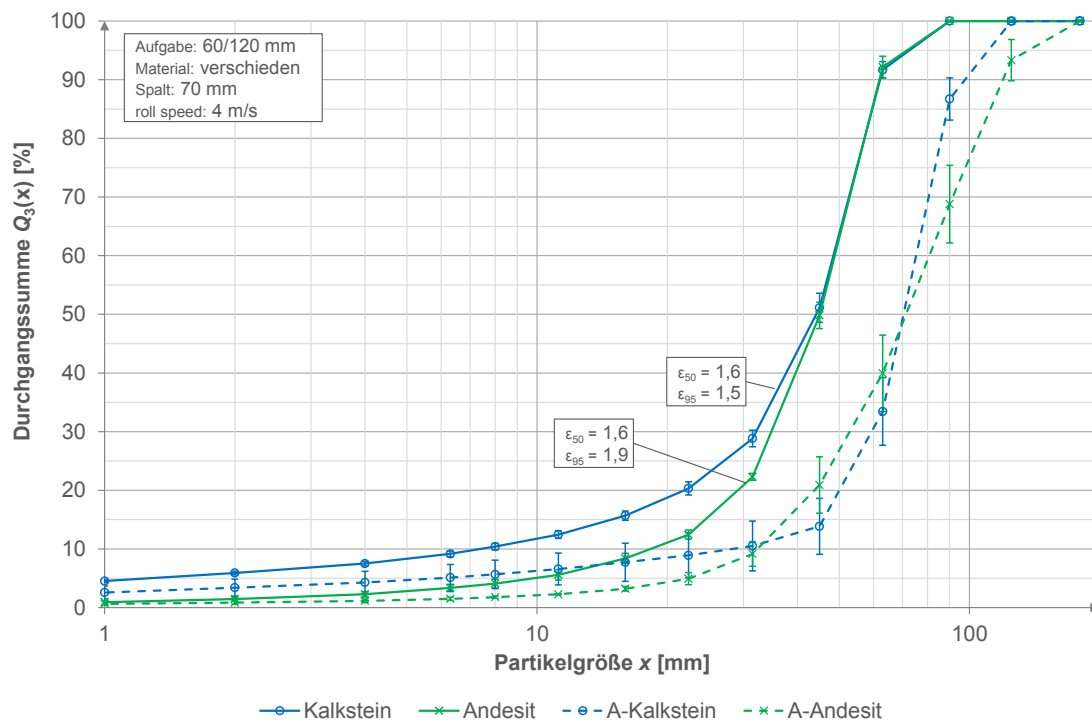


Abbildung 80: Produktpartikelgrößenverteilung in Abhängigkeit von der Materialart der Aufgabefraktion 60/120 mm, Spaltweite 70 mm, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s

A.3 Massedurchsatz

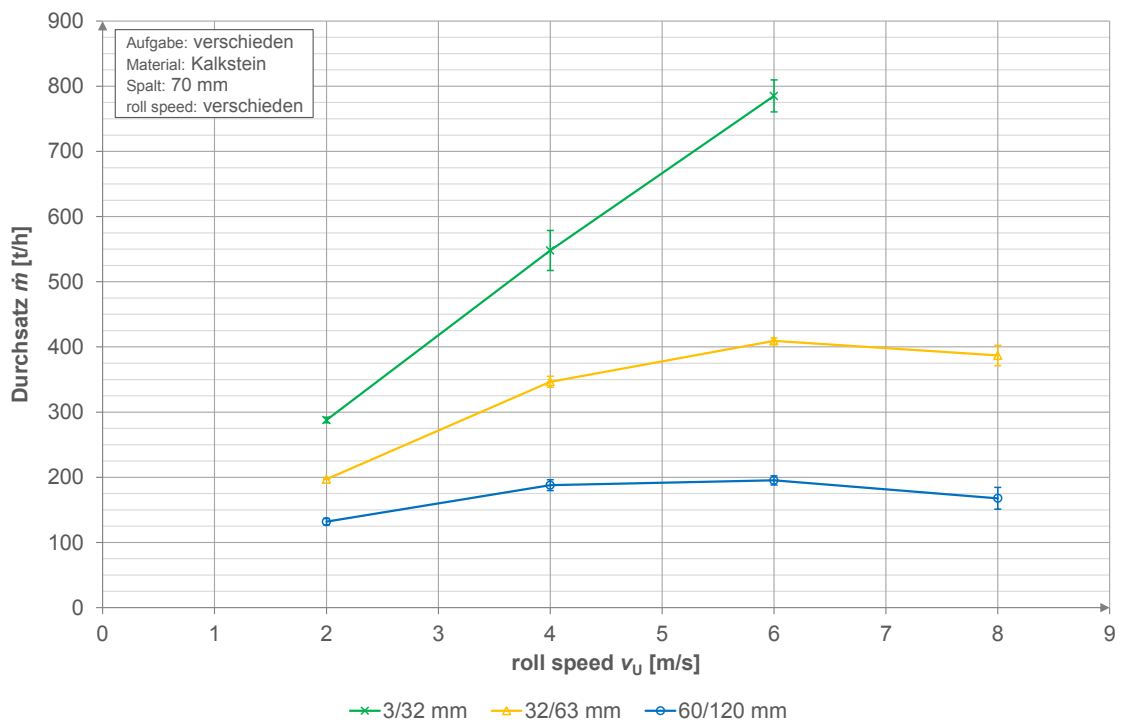


Abbildung 81: Massedurchsatz in Abhängigkeit von der Walzenumfangsgeschwindigkeit für verschiedene Materialien und Aufgabefraktionen, Spaltweite 70 mm

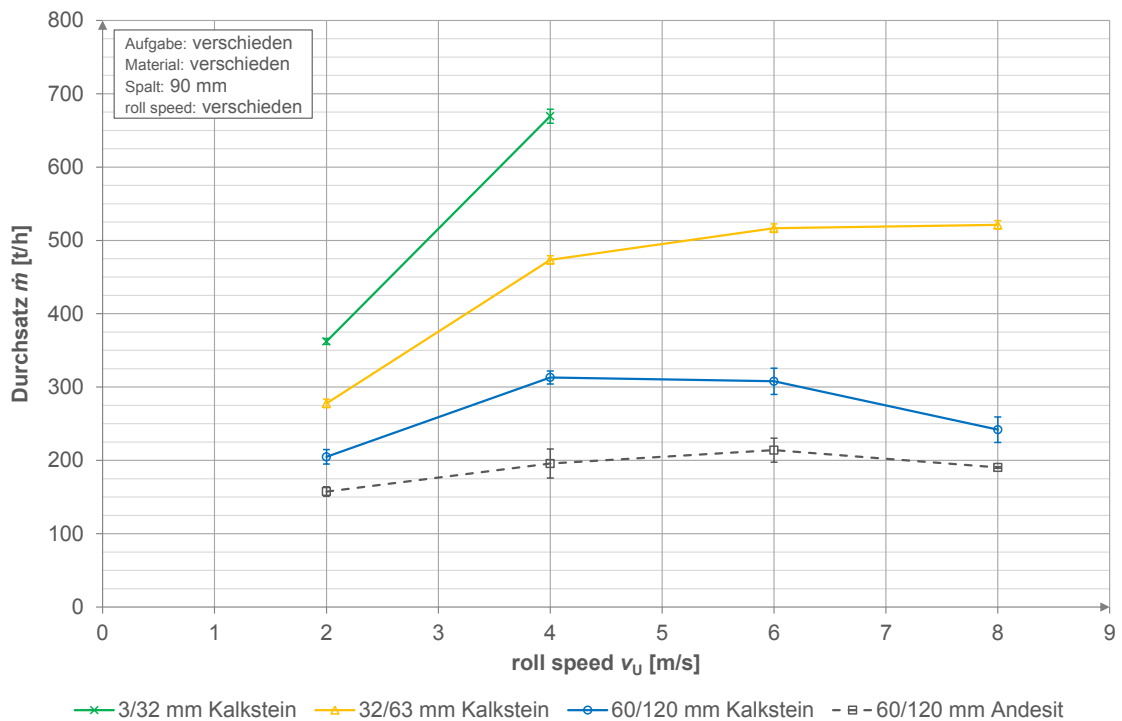


Abbildung 82: Massedurchsatz in Abhängigkeit von der Walzenumfangsgeschwindigkeit für verschiedene Materialien und Aufgabefraktionen, Spaltweite 90 mm

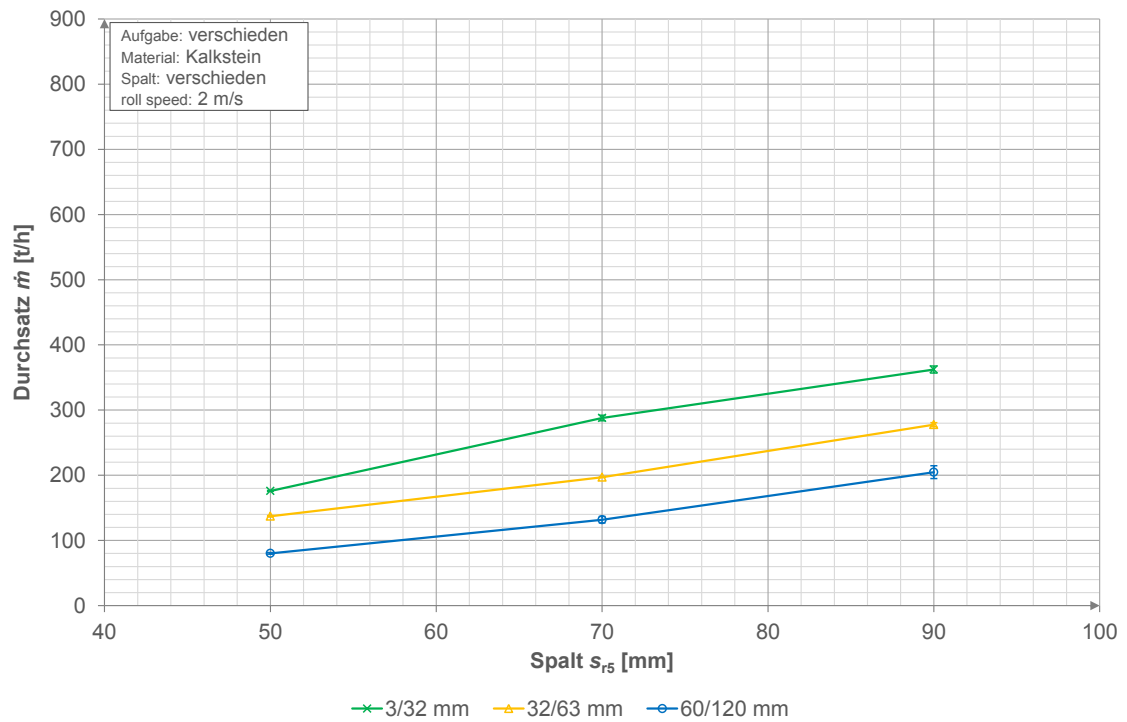


Abbildung 83: Massedurchsatz in Abhängigkeit von der Spaltweite für Kalkstein für verschiedene Aufgabefractionen, Walzenumfangsgeschwindigkeit 2 m/s

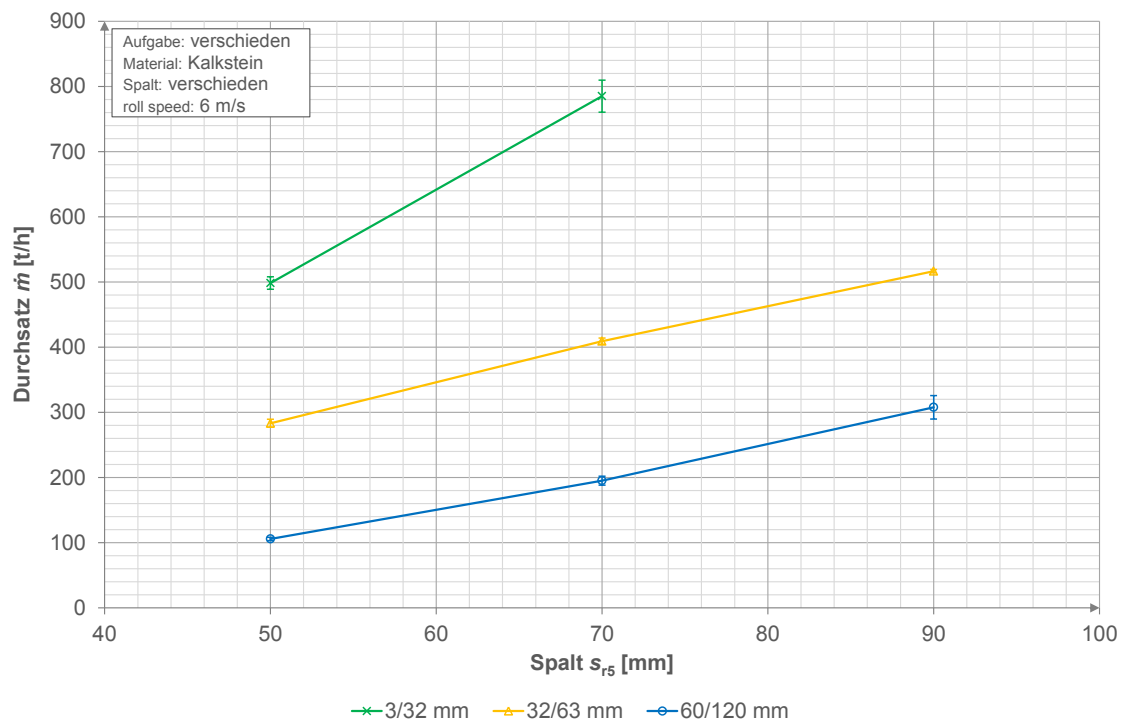


Abbildung 84: Massedurchsatz in Abhängigkeit von der Spaltweite für Kalkstein für verschiedene Aufgabefractionen, Walzenumfangsgeschwindigkeit 6 m/s

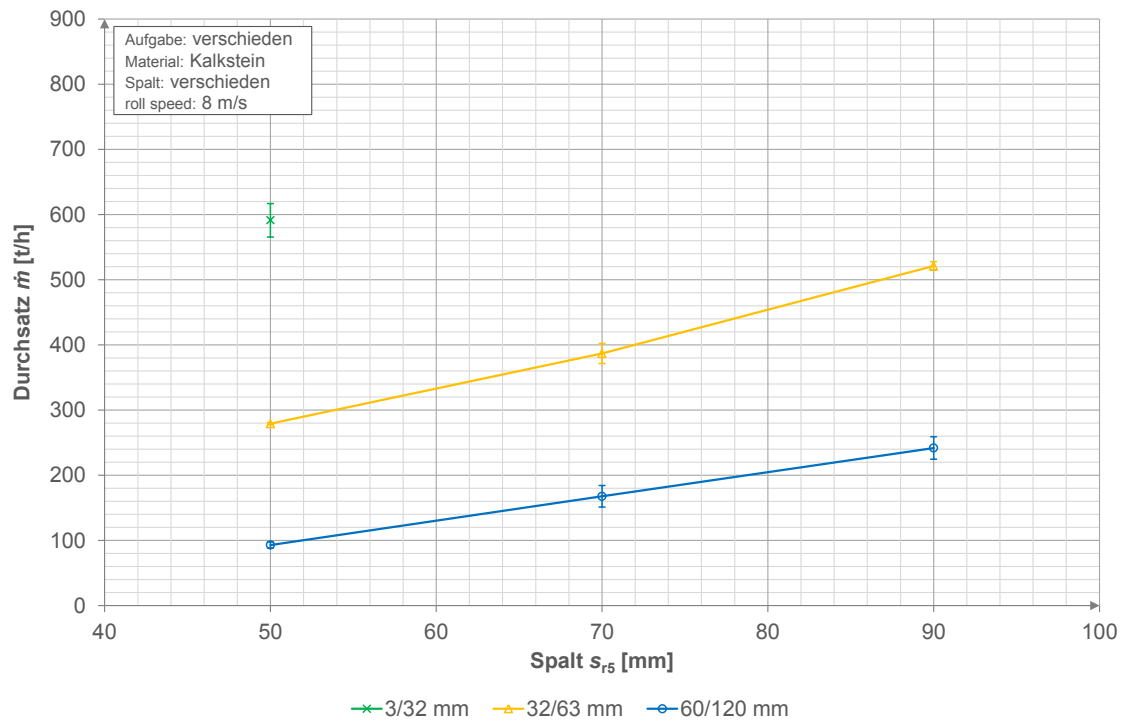


Abbildung 85: Massedurchsatz in Abhängigkeit von der Spaltweite für Kalkstein für verschiedene Aufgabefractionen, Walzenumfangsgeschwindigkeit 8 m/s

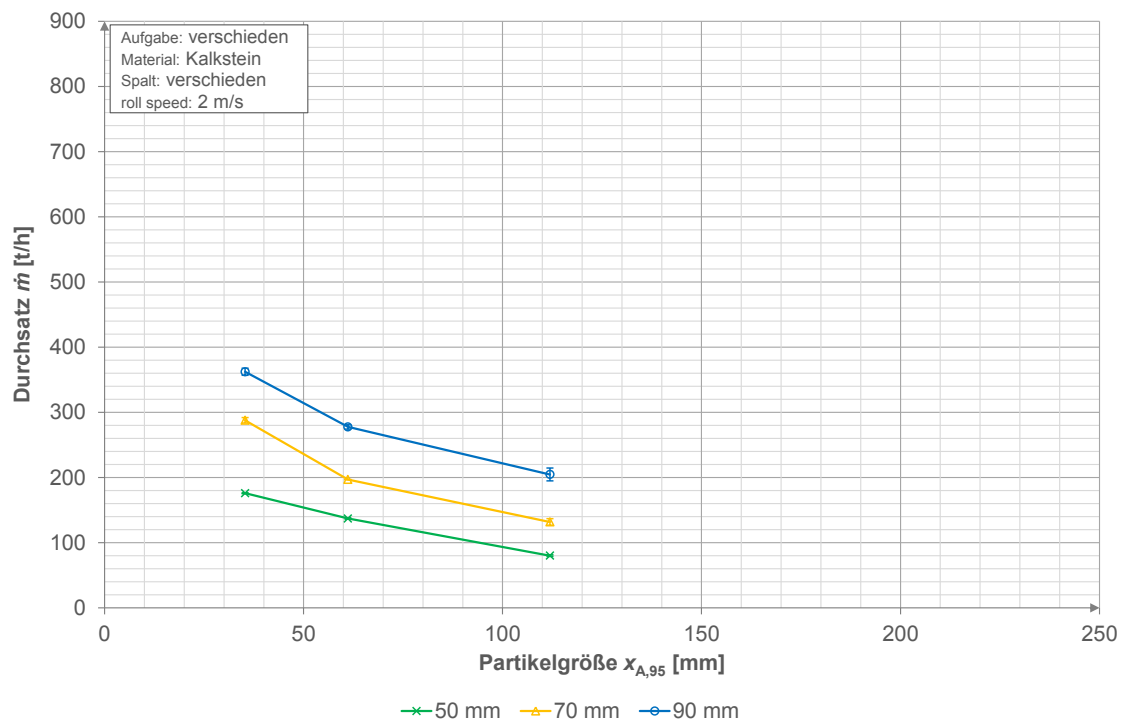


Abbildung 86: Massedurchsatz in Abhängigkeit von der Aufgabepartikelgröße für Kalkstein für verschiedene Spaltweiten, Walzenumfangsgeschwindigkeit 2 m/s

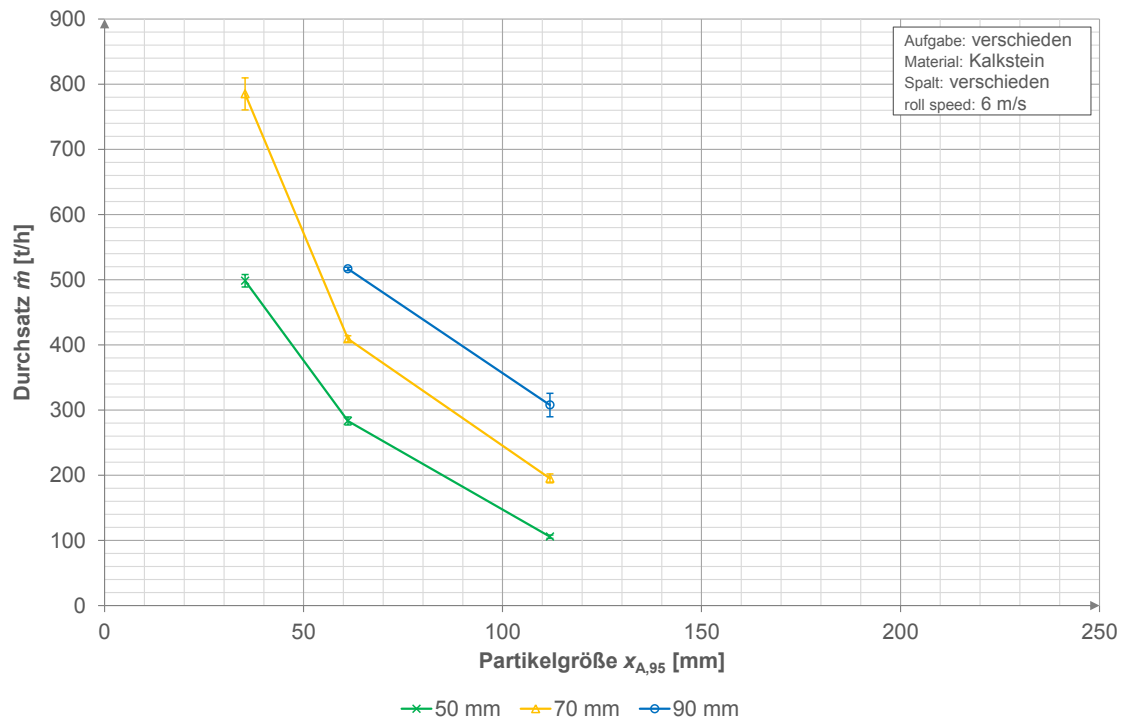


Abbildung 87: Massedurchsatz in Abhängigkeit von der Aufgabepartikelgröße für Kalkstein für verschiedene Spaltweiten, Walzenumfangsgeschwindigkeit 6 m/s

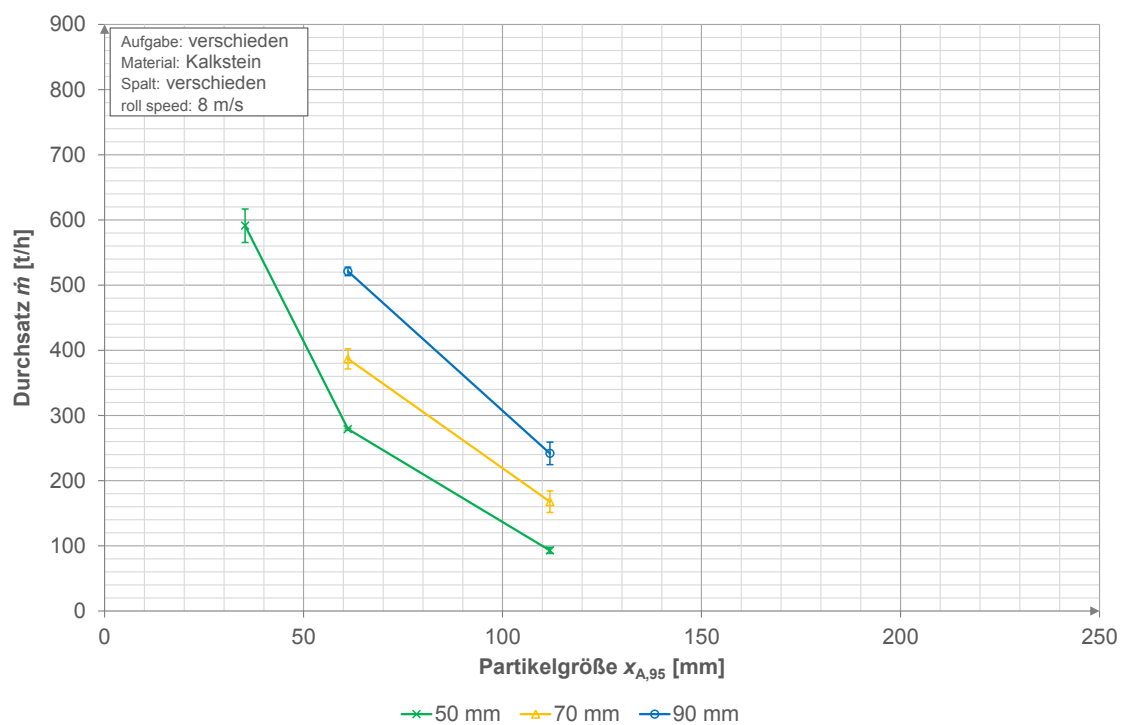


Abbildung 88: Massedurchsatz in Abhängigkeit von der Aufgabepartikelgröße für Kalkstein für verschiedene Spaltweiten, Walzenumfangsgeschwindigkeit 8 m/s

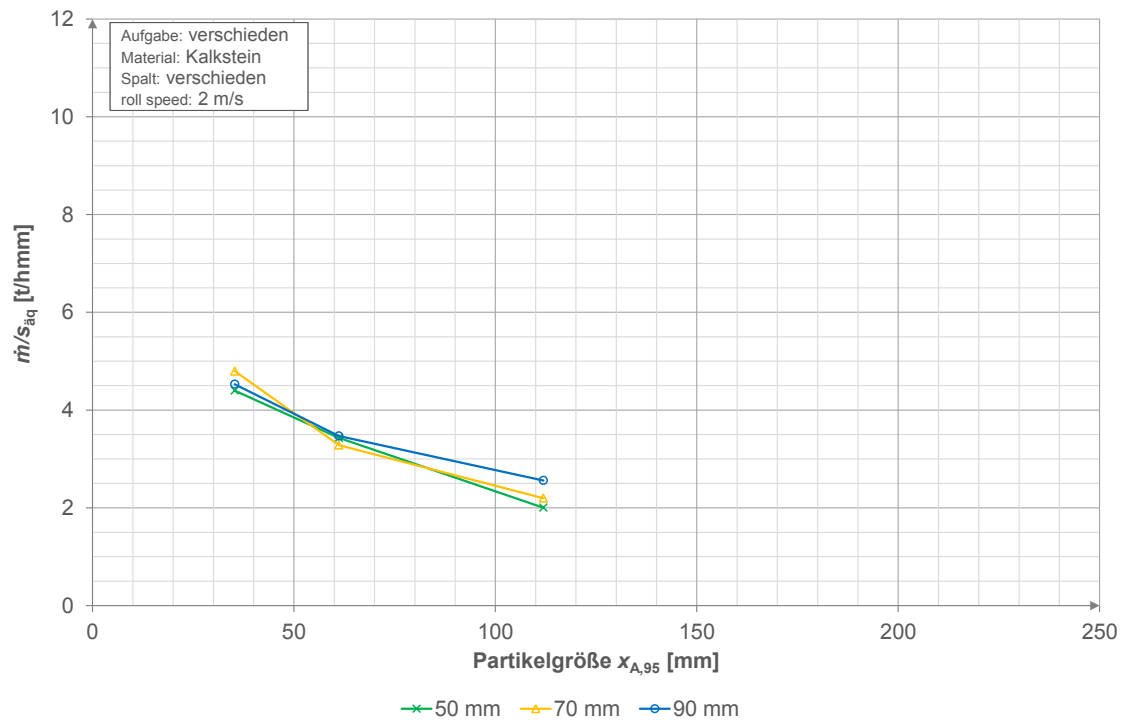


Abbildung 89: Verhältnis $\dot{m}/s_{\text{äq}}$ in Abhängigkeit von der Aufgabepartikelgröße für Kalkstein für verschiedene Spaltweiten, Walzenumfangsgeschwindigkeit 2 m/s

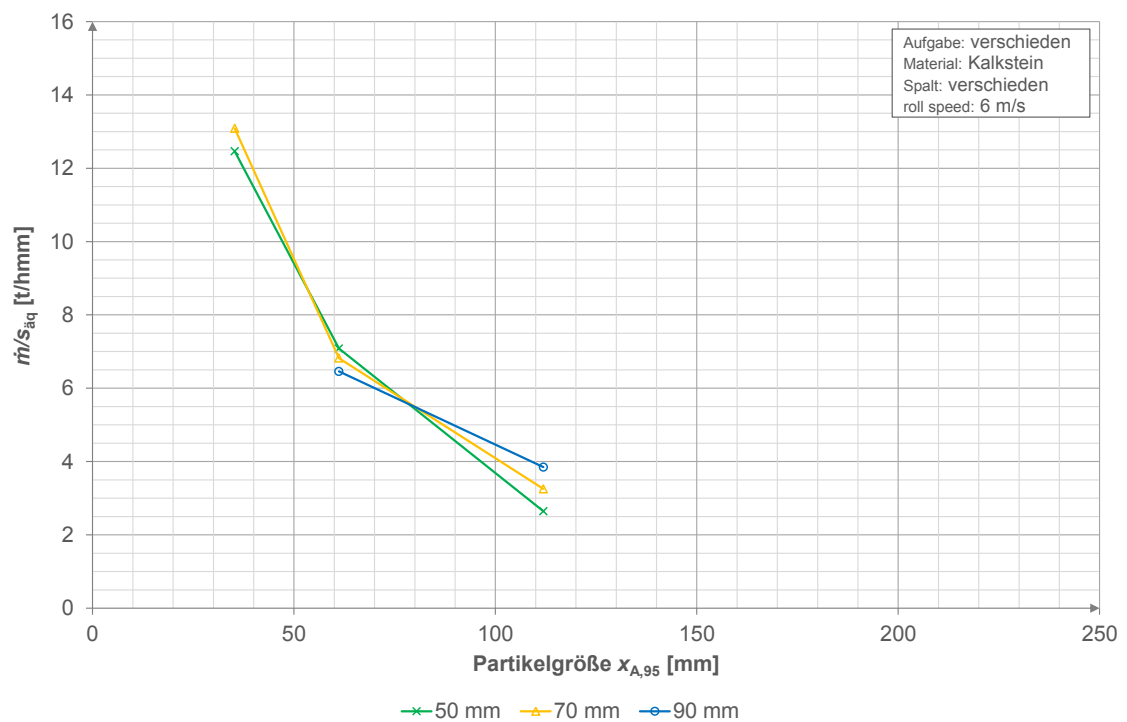


Abbildung 90: Verhältnis $\dot{m}/s_{\text{äq}}$ in Abhängigkeit von der Aufgabepartikelgröße für Kalkstein für verschiedene Spaltweiten, Walzenumfangsgeschwindigkeit 6 m/s

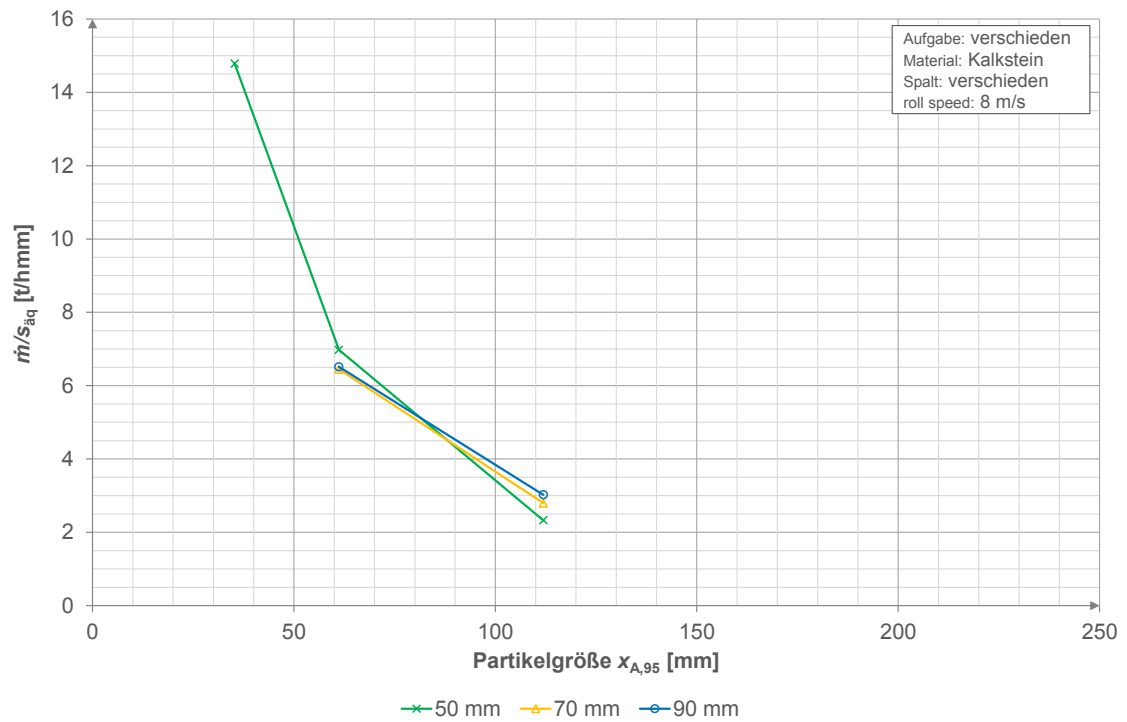


Abbildung 91: Verhältnis $\dot{m}/s_{\text{äq}}$ in Abhängigkeit von der Aufgabepartikelgröße für Kalkstein für verschiedene Spaltweiten, Walzenumfangsgeschwindigkeit 8 m/s

B Tabellen

Tabelle 27: Ergebnisse der einzelnen PLT für Kalkstein nach ISRM [45]

Test Nr.	Punktlastindex \pm Standardabweichung $I_{S(50)} \pm \sigma$ [MPa]
1	4,09 \pm 1,24
2	3,68 \pm 0,89
3	3,90 \pm 0,94
4	3,71 \pm 1,02
5	4,25 \pm 1,21
6	3,54 \pm 1,07
Mittelwert	3,86 \pm 1,06

Tabelle 28: Experimentell ermittelte $x_{P,50}$ -Werte der Kalksteinprodukte und kurvenangepasste $x_{P,50}$ -Werte der Swebrec-Funktion im Vergleich, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s

Spalt s_{r5} [mm]	Aufgabe [mm]	$x_{P,50}$ (experimentell) [mm]	$x_{P,50}$ (Swebrec) [mm]	Differenz (Betrag) [mm]	$x_{P,max}$ [mm]	b-Wert	R^2
50	3/32	11,1	11,6	0,5	31,5	2,02	0,998
	32/63	27,2	25,4	1,8	63	2,06	0,988
	60/120	24,8	23,8	1,0	63	2,00	0,996
	1-2-1	21,9	21,3	0,6	63	2,20	0,997
	1-1-4	22,1	21,1	1,0	63	2,01	0,996
70	32/63	36,8	36,5	0,3	63	2,16	0,988
	60/120	44,3	42,1	2,2	90	2,16	0,988
	2-1-1	22,0	22,0	0,1	90	2,59	0,997
	1-2-1	31,7	28,4	3,3	90	2,23	0,992
	1-1-2	29,9	28,1	1,9	90	2,18	0,996
	1-1-4	34,9	32,5	2,4	90	2,13	0,994
90	60/120	57,2	58,2	1,0	90	1,94	0,995
	1-2-1	38,5	37,3	1,2	90	2,15	0,996
	1-1-4	47,4	46,6	0,9	90	1,68	0,999
Mittelwert	-	-	-	1,3 \pm 0,9	-	2,11 \pm 0,20	0,994 \pm 0,004

Tabelle 29: Experimentell ermittelte $x_{P,50}$ -Werte der Andesitprodukte und kurvenangepasste $x_{P,50}$ -Werte der Swebrec-Funktion im Vergleich, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s

Spalt s_{r5} [mm]	Aufgabe [mm]	$x_{P,50}$ (experimentell) [mm]	$x_{P,50}$ (Swebrec) [mm]	Differenz (Betrag) [mm]	$x_{P,max}$ [mm]	b -Wert	R^2
50	32/63	31,3	30,7	0,6	63	2,98	0,995
	60/120	33,9	32,0	1,9	63	2,23	0,996
70	60/120	45,1	44,3	0,8	90	2,23	0,998
90	60/120	55,9	55,8	0,1	125	3,25	0,999
Mittelwert	-	-	-	$0,9 \pm 0,8$	-	$2,86 \pm 0,44$	$0,997 \pm 0,002$

Tabelle 30: Experimentell ermittelte $x_{P,50}$ -Werte des Diabasproduktes und kurvenangepasster $x_{P,50}$ -Wert der Swebrec-Funktion im Vergleich, Walzenumfangsgeschwindigkeit 4 m/s

Spalt s_{r5} [mm]	Aufgabe [mm]	$x_{P,50}$ (experimentell) [mm]	$x_{P,50}$ (Swebrec) [mm]	Differenz (Betrag) [mm]	$x_{P,max}$ [mm]	b -Wert	R^2
50	32/63	31,1	31,7	0,4	63	3,16	0,994

Tabelle 31: Verweilzeiten der Überpartikelversuche mit Materialdruck, experimentell ermittelt

Spalt s_{r5} [mm]	Fraktion [mm]	Verweilzeit pro Stein [s]	VarK [%]	Anteil d. Überpartikel [%]	VarK [%]
50	120/160	10,6	18,9	0,79	17,6
	160/200	27,4	16,8	0,60	15,8
	200/250	45,5	27,4	0,80	32,5
70	120/160	5,1	16,0	1,20	16,7
	160/200	11,6	29,9	1,03	24,0
	200/250	23,9	30,4	1,10	27,4
90	120/160	2,7	10,7	1,73	4,3
	160/200	6,0	23,3	1,56	23,2
	200/250	11,7	22,5	1,82	21,3

C Berechnungen

Äquivalenter Walzendurchmesser und Walzenspalt

Die Berechnung des volumenäquivalenten Walzendurchmessers $D_{W,\ddot{a}q}$ erfolgt nach den folgenden Gleichungen.

$$V_{\ddot{a}q} = V_{\text{Profilwalze}} = V_W + z_{\text{axial}} \cdot z_{\text{radial}} \cdot V_{\text{Zahn}} + z_{\text{axial}} \cdot z_{\text{radial}} \cdot V_{\text{Nocke}} \quad (\text{C.1})$$

$$V_{\ddot{a}q} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{W,\ddot{a}q}^2 \cdot B_W \quad (\text{C.2})$$

mit

V_W ...Volumen des Walzenkörpers bis Anfang der Zähne (\varnothing 380 mm)

V_{Zahn} ...Volumen eines Zahns

V_{Nocke} ...Volumen einer Nocke

z_{axial} ...Anzahl der Zähne/Nocken in axialer Richtung

z_{radial} ...Anzahl der Zähne/Nocken in Umfangsrichtung

$D_{W,\ddot{a}q}$...Äquivalenzdurchmesser der Walze

L_W ...Walzenlänge

Durch Umstellen der Gleichung (C.2) nach $D_{W,\ddot{a}q}$ und Einsetzen von (C.1) ergibt sich $D_{W,\ddot{a}q} = 389,4 \text{ mm} \approx 390 \text{ mm}$.

Der äquivalente Walzenspalt $s_{\ddot{a}q}$ ergibt sich folglich aus der Differenz von Achsabstand der Walzen a_W der jeweiligen Spalteinstellung und einfachem Walzenäquivalentdurchmesser $D_{W,\ddot{a}q}$ nach Gleichung (C.3).

$$s_{\ddot{a}q} = a_W - D_{W,\ddot{a}q} \quad (\text{C.3})$$

Die nachfolgende Tabelle fasst die errechneten Äquivalentspaltweiten zusammen.

Tabelle 32: Nennspaltweite, Achsabstand der Walzen und Äquivalenzspaltweite

Nennspalt $s_{r5} \text{ [mm]}$	Achsabstand $a_W \text{ [mm]}$	Äquivalenzspalt $s_{\ddot{a}q} \text{ [mm]}$
50	430	40
70	450	60
90	470	80